

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
 - TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
 - FADED TEXT
 - ILLEGIBLE TEXT
 - SKEWED/SLANTED IMAGES
 - COLORED PHOTOS
 - BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
-
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

THIS PAGE BLANK (USPTO)

01807.001874



PATENT APPLICATION

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

| | | |
|--------------------------------|---|----------------------------|
| In re Application of: |) | |
| | : | Examiner: Unassigned |
| Eric MAJANI |) | |
| | : | Group Art Unit: Unassigned |
| Application No.: 09/972,994 |) | |
| | : | |
| Filed: October 10, 2001 |) | |
| | : | |
| For: DIGITAL FILTERING METHODS |) | |
| AND DEVICES | : | |
| |) | Date: January 10, 2002 |

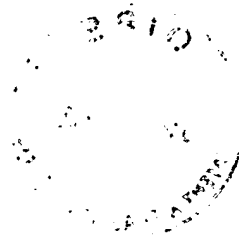
Commissioner for Patents
Washington, D.C. 20231

SUBMISSION OF PRIORITY DOCUMENT

Sir:

In support of Applicant's claim for priority under 35 U.S.C. § 119, enclosed is
a certified copy of the following foreign application:

0013955, filed October 30, 2000.



THIS PAGE BLANK (USPTO)

Applicant's undersigned attorney may be reached in our Washington, D.C. office by telephone at (202) 530-1010. All correspondence should continue to be directed to our address given below.

Respectfully submitted,

Michael Kondoudis
Attorney for Applicant
Michael E. Kondoudis
Registration No. 42,758

FITZPATRICK, CELLA, HARPER & SCINTO
30 Rockefeller Plaza
New York, New York 10112-3801
Facsimile: (212) 218-2200

MEK/tmc/lmj

DC_MAIN 83445 v 1

THIS PAGE BLANK (USPTO)



BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

01 OCT. 2001

Fait à Paris, le

Pour le Directeur général de l'Institut
national de la propriété industrielle
Le Chef du Département des brevets

Martine PLANCHE

INSTITUT
NATIONAL DE
LA PROPRIÉTÉ
INDUSTRIELLE

SIEGE :
26 bis, rue de Saint Petersburg
75800 PARIS cedex 08
Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04
Télécopie : 33 (1) 42 93 59 30
www.inpi.fr

THIS PAGE BLANK (USPTO)

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE 1/2

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 540 W / 19C600

| | | | |
|---|--|--|--|
| <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px;">Réservé à l'INPI</div> | | | |
| REMISE DES PIÈCES DATE 30 OCT 2000 LIEU 75 INPI PARIS B N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI 0013955 DATE DE DÉPÔT ATTRIBUÉE 30 OCT. 2000 PAR L'INPI | | 1 NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE RINUY, SANTARELLI 14, avenue de la Grande Armée 75017 PARIS | |
| Vos références pour ce dossier <i>(facultatif)</i> BIF022851/FR | | | |
| Confirmation d'un dépôt par télécopie | | <input type="checkbox"/> N° attribué par l'INPI à la télécopie | |
| 2 NATURE DE LA DEMANDE Demande de brevet Demande de certificat d'utilité Demande divisionnaire <i>Demande de brevet initiale</i> <i>ou demande de certificat d'utilité initiale</i> Transformation d'une demande de brevet européen <i>Demande de brevet initiale</i> | | Cochez l'une des 4 cases suivantes <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> N° _____ Date ____/____/____ N° _____ Date ____/____/____ N° _____ Date ____/____/____ | |
| 3 TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum) Procédés et dispositifs de filtrage numérique | | | |
| 4 DÉCLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE FRANÇAISE | | Pays ou organisation _____ N° _____ Date ____/____/____ Pays ou organisation _____ N° _____ Date ____/____/____ Pays ou organisation _____ N° _____ Date ____/____/____ <input type="checkbox"/> S'il y a d'autres priorités, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite» | |
| 5 DEMANDEUR Nom ou dénomination sociale Prénoms Forme juridique N° SIREN Code APE-NAF Adresse _____ Rue _____ _____ Code postal et ville _____ Pays _____ Nationalité _____ N° de téléphone <i>(facultatif)</i> _____ N° de télécopie <i>(facultatif)</i> _____ Adresse électronique <i>(facultatif)</i> _____ | | <input type="checkbox"/> S'il y a d'autres demandeurs, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite» CANON KABUSHIKI KAISHA Société de droit Japonais _____ _____ 30-2, Shimomaruko 3-chome, Ohta-ku _____ Tokyo JAPON JAPONAISE | |

| | | | | | |
|---|--|------------------|--|-------------------|--|
| REMISE DES PIÈCES DATE 30 OCT 2000 LIEU 75 INPI PARIS B N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI 0013955 | | Réservé à l'INPI | | DB 540 W / 190500 | |
| Vos références pour ce dossier : <i>(facultatif)</i> | | | BIF022851/FR | | |
| 6 MANDATAIRE Nom Prénom Cabinet ou Société N ° de pouvoir permanent et/ou de lien contractuel Adresse Rue Code postal et ville N° de téléphone <i>(facultatif)</i> N° de télécopie <i>(facultatif)</i> Adresse électronique <i>(facultatif)</i> | | | RINUY, SANTARELLI 14 AVENUE DE LA GRANDE ARMEE 75017 PARIS 01 40 55 43 43 | | |
| 7 INVENTEUR (S) | | | | | |
| Les inventeurs sont les demandeurs | | | <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non Dans ce cas fournir une désignation d'inventeur(s) séparée | | |
| 8 RAPPORT DE RECHERCHE | | | Uniquement pour une demande de brevet (y compris division et transformati n) | | |
| Établissement immédiat ou établissement différé | | | <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> | | |
| Paiement échelonné de la redevance | | | Paiement en deux versements, uniquement pour les personnes physiques <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | | |
| 9 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES | | | Uniquement pour les personnes physiques <input type="checkbox"/> Requête pour la première fois pour cette invention <i>(joindre un avis de non-imposition)</i> <input type="checkbox"/> Requête antérieurement à ce dépôt <i>(joindre une copie de la décision d'admission pour cette invention ou indiquer sa référence) :</i> | | |
| Si v us avez utilisé l'imprimé «Suite», indiquez le nombre de pages jointes | | | | | |
| 10 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE (N m et qualité du signataire) | | | VISA DE LA PRÉFECTURE OU DE L'INPI | | |
| Bruno QUANTIN N° 92 1206 RINUY, SANTARELLI | | |  | | |

DÉPARTEMENT DES BREVETS

26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08

Téléphone : 01 53 04 53 04 Télécopie : 01 42 94 86 54

DÉSIGNATION D'INVENTEUR(S) Page N° 1/1.

(Si le demandeur n'est pas l'inventeur ou l'unique inventeur)

Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 113 W / 260899

| | | | |
|--|-----------------------------|--|----------------|
| Vos références pour ce dossier (facultatif) | | BIF022851/FR | |
| N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL | | 0013055 | |
| TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum) | | | |
| Procédés et dispositifs de filtrage numérique | | | |
| LE(S) DEMANDEUR(S) : | | | |
| CANON KABUSHIKI KAISHA | | | |
| DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) : (Indiquez en haut à droite «Page N° 1/1» S'il y a plus de trois inventeurs, utilisez un formulaire identique et numérotez chaque page en indiquant le nombre total de pages). | | | |
| Nom | | MAJANI | |
| Prénoms | | Eric | |
| Adresse | Rue | 7, rue Château-Renault | |
| | Code postal et ville | 35000 | RENNES, FRANCE |
| Société d'appartenance (facultatif) | | | |
| Nom | | | |
| Prénoms | | | |
| Adresse | Rue | | |
| | Code postal et ville | | |
| Société d'appartenance (facultatif) | | | |
| Nom | | | |
| Prénoms | | | |
| Adresse | Rue | | |
| | Code postal et ville | | |
| Société d'appartenance (facultatif) | | | |
| DATE ET SIGNATURE(S) DU (DES) DEMANDEUR(S) OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire) | | Le 30 octobre 2000 Bruno QUANTIN N° 2.1206 RINUY, SANTARELLI | |

PROCEDES ET DISPOSITIFS DE FILTRAGE NUMERIQUE

La présente invention se rapporte à des procédés et à des dispositifs de filtrage numérique.

5 Elle trouve une application avantageuse au filtrage d'images numériques, en particulier pour la compression d'images conformément à "JPEG 2000", en cours de normalisation.

On connaît notamment deux techniques pour réaliser (en anglais "*implement*") le filtrage de signaux numériques en utilisant des filtres en
10 ondelettes (en anglais "*wavelet filters*") :

- le filtrage par convolution et
- le filtrage par augmentation ou "*lifting*".

On rappelle ci-après quelques notions élémentaires sur les filtres en ondelettes, puis sur le *lifting*.

15 On sait que le filtrage en ondelettes d'un signal monodimensionnel X_i peut être défini comme :

- la convolution d'un filtre passe-bas $H_0(k)$ avec le signal X_i , le signal Y_n résultant de la convolution étant sous-échantillonné (ou décimé, en anglais "*downsampled*") par un facteur de deux :

$$20 \quad Y_{2n} = \sum_k H_0(k) \cdot X_{2n-k} \quad (1)$$

et

- la convolution d'un filtre passe-haut $H_1(k)$ avec le signal X_i , le signal Y_n résultant de la convolution étant décimé par un facteur de deux :

$$Y_{2n+1} = \sum_k H_1(k) \cdot X_{2n+1-k} \quad (2)$$

25 Le résultat du filtrage, appelé opération de filtrage en ondelettes (H_0 , H_1), produit un signal Y_i dont chaque échantillon de rang pair Y_{2n} est un coefficient passe-bas et chaque échantillon de rang impair Y_{2n+1} est un coefficient passe-haut.

30 Le filtre passe-bas et le filtre passe-haut doivent satisfaire certaines conditions, appelées conditions de reconstruction parfaite, de façon que la reconstruction parfaite du signal X_i à partir du signal Y_i soit possible.

Si on utilise la notation de la transformée en z pour les filtres à réponse impulsionnelle finie, à savoir,

$$H_i(z) = \sum_k H_i(k).z^{-k}, \quad (3)$$

alors la condition de reconstruction parfaite que les filtres doivent satisfaire est :

$$5 \quad H_0(z).H_1(-z^{-1}) + H_0(-z).H_1(z^{-1}) = 2. \quad (4)$$

On sait que certains filtres en ondelettes présentent des propriétés de symétrie.

Un filtre en ondelettes symétrique de longueur impaire $H(k)$ (en anglais "*odd-length symmetric wavelet filter*") ou filtre WSS (en anglais "*Whole-Sample-Symmetric*") est défini par la relation suivante, dite symétrie WSS, entre
10 tous les coefficients du filtre :

$$\forall k, H(-k) = H(k) \quad (5)$$

Un filtre en ondelettes symétrique de longueur paire (en anglais "*even-length symmetric wavelet filter*") ou filtre HSS (en anglais "*Half-Sample-Symmetric*") est défini par la relation suivante, dite symétrie HSS, entre tous les
15 coefficients du filtre :

$$\forall k, H(-k) = H(k + 1). \quad (6)$$

Un filtre en ondelettes antisymétrique de longueur paire (en anglais "*even-length antisymmetric wavelet filter*") ou filtre HSA (en anglais "*Half-Sample-Antisymmetric*") est défini par la relation suivante, dite symétrie HSA,
20 entre tous les coefficients du filtre :

$$\forall k, H(-k) = -H(k + 1). \quad (7)$$

La technique du lifting, mentionnée plus haut, consiste à réaliser (en anglais "*implement*") une étape de filtrage en la décomposant en une séquence
25 équivalente d'opérations élémentaires de filtrage, appelées étapes de lifting (en anglais "*lifting steps*"). Cette décomposition est appelée factorisation lifting (en anglais "*lifting factorization*"). Pour plus de détails sur la factorisation lifting, on se reportera utilement à l'article de Ingrid DAUBECHIES et Wim SWELDENS intitulé "*Factoring wavelet transforms into lifting steps*", in J. Fourier Anal. Appl.,
30 vol. 4, n° 3, pages 247 à 269, 1998.

On rappelle en particulier que, lorsqu'on réalise une opération de filtrage sous forme d'étapes de lifting, pour transformer un signal X_i en un signal Y_i , on commence généralement par copier tous les échantillons du signal X_i dans le signal Y_i (i.e. $Y_i = X_i$), puis on modifie alternativement les échantillons de rang pair et les échantillons de rang impair du signal Y_i .

Il existe deux types d'étapes de lifting :

- les étapes de lifting passe-haut et
- les étapes de lifting passe-bas.

Une étape de lifting passe-haut consiste à modifier des échantillons de rang impair (ou d'indice impair, en anglais "*odd-indexed samples*") (passe-haut) en leur ajoutant une fonction d'échantillons de rang pair (ou d'indice pair, en anglais "*even-indexed samples*") pondérés ou filtrés :

$$\forall n, Y_{2n+1} = Y_{2n+1} + R\left(\sum_k a_k \cdot Y_{2n+2k}\right) \quad (8)$$

La fonction R est, de façon générale, toute approximation de la variable x . La fonction R peut être un opérateur d'arrondi qui arrondit une valeur réelle x à un entier (tel que l'entier le plus proche), ou peut être simplement l'identité : $R(x) = x$.

Une étape de lifting passe-bas consiste à modifier des échantillons de rang pair (passe-bas) en leur ajoutant une fonction d'échantillons de rang impair pondérés ou filtrés :

$$\forall n, Y_{2n} = Y_{2n} + R\left(\sum_k b_k \cdot Y_{2n+2k+1}\right) \quad (9)$$

Dans le cas où $R(x) = x$, à chaque étape de lifting, chaque échantillon passe-bas Y_{2n} peut être exprimé sous forme d'une combinaison linéaire d'échantillons du signal X_i , correspondant à un filtrage passe-bas du signal X_i . Ainsi, chaque étape de lifting passe-bas peut être associée à un filtre passe-bas.

On dit que chaque étape de lifting passe-bas "transforme par augmentation" (en anglais "*lifts*") un filtre passe-bas (celui qui est associé à l'étape de lifting passe-bas précédente) en un autre filtre passe-bas (celui qui est associé à l'étape de lifting passe-bas courante). Le terme lifting rend compte

du fait que le support du filtre passe-bas résultant (c'est-à-dire le nombre de coefficients du filtre) est plus grand que celui du filtre passe-bas correspondant à l'étape précédente. Le filtre passe-bas de support plus grand finalement obtenu par lifting est appelé "filtre passe-bas équivalent".

- 5 Il en va de même pour les filtres passe-haut et les étapes de lifting, c'est-à-dire que chaque étape de lifting passe-haut peut être vue comme le lifting d'un filtre passe-haut en un filtre passe-haut de support plus grand, appelé "filtre passe-haut équivalent".

10 La même terminologie est utilisée dans le cas où la fonction d'approximation R n'est pas l'identité.

Ainsi, la réalisation par lifting (en anglais "*lifting-based implementation*") d'une opération de filtrage en ondelettes (H_0 , H_1) peut être vue comme une séquence d'opérations au cours desquelles, alternativement et de façon itérative, des filtres passe-bas sont transformés par augmentation en
15 filtres passe-bas équivalents de support plus grand, et des filtres passe-haut sont transformés par augmentation en filtres passe-haut équivalents de support plus grand, ce jusqu'à ce que le filtre passe-bas soit égal à H_0 et que le filtre passe-haut soit égal à H_1 .

20 On rencontre également plusieurs types de symétries dans les étapes de lifting :

- il existe deux types d'étapes de lifting symétriques :
 - des étapes de lifting à symétrie WSS et
 - des étapes de lifting à symétrie HSS ; et
- il existe deux types d'étapes de lifting antisymétriques :
 - 25 • des étapes de lifting à antisymétrie WSA et
 - des étapes de lifting à antisymétrie HSA.

Une étape de lifting symétrique de longueur impaire ou lifting WSS (en anglais "*Whole-Sample-Symmetric lifting*") est définie par une relation de symétrie WSS entre les coefficients de filtrage de l'étape de lifting :

30
$$a_{-k} = a_k \quad (10)$$

Une étape de lifting symétrique de longueur paire ou lifting HSS (en anglais "*Half-Sample-Symmetric lifting*") est définie par une relation de symétrie HSS entre les coefficients de filtrage de l'étape de lifting :

$$a_{-k} = a_{k-1} \quad (11)$$

5 Une étape de lifting antisymétrique de longueur impaire ou lifting WSA (en anglais "*Whole-Sample-Antisymmetric lifting*") est définie par une relation de symétrie WSA entre les coefficients de filtrage de l'étape de lifting :

$$a_0 = 0 \text{ et } a_{-k} = -a_k \quad (12)$$

10 Une étape de lifting antisymétrique de longueur paire ou lifting HSA (en anglais "*Half-Sample-Antisymmetric lifting*") est définie par une relation de symétrie HSA entre les coefficients de filtrage de l'étape de lifting :

$$a_{-k} = -a_{k-1} \quad (13)$$

15 Une étape de lifting à coefficient unique ou lifting SC (en anglais "*Single-Coefficient lifting*") est définie par le fait que tous les coefficients de filtrage de l'étape de lifting sauf un (noté $a_{k'}$) sont nuls.

Pour les étapes de lifting passe-bas,

- si $k' = 0$, l'étape de lifting est appelée étape de lifting passe-bas à coefficient unique à droite ou lifting passe-bas RSC (en anglais "*Right-side Single Coefficient*") et
- 20 - si $k' = -1$, l'étape de lifting est appelée étape de lifting passe-bas à coefficient unique à gauche ou lifting passe-bas LSC (en anglais "*Left-side Single Coefficient*").

De façon analogue, pour les étapes de lifting passe-haut,

- si $k' = 1$, l'étape de lifting est appelée étape de lifting passe-haut à coefficient unique à droite ou lifting passe-haut RSC et
- 25 - si $k' = 0$, l'étape de lifting est appelée étape de lifting passe-haut à coefficient unique à gauche ou lifting passe-haut LSC.

30 Etant donné qu'à l'heure actuelle, de plus en plus d'algorithmes de compression de signaux utilisent des opérations de filtrage en ondelettes pour la décorrélation des signaux, il est très intéressant de disposer d'une réalisation efficace de ces opérations de filtrage. Divers algorithmes de compression d'images utilisent des transformations en ondelettes bidimensionnelles, qui

consistent en l'application successive de transformations monodimensionnelles du type décrit en introduction.

Une réalisation efficace du filtrage monodimensionnel à base d'ondelettes est le filtrage à base de lifting.

5 On sait en effet que le filtrage par lifting permet de réduire le nombre d'opérations de filtrage (multiplications et additions) et permet également une réalisation inversible du filtrage à base d'ondelettes, c'est-à-dire avec reconstruction parfaite du signal, sans perte d'information, dans le cas de signaux dont les valeurs d'échantillons sont entières.

10 En outre, l'étape inverse d'une étape de lifting est obtenue de façon triviale en changeant le signe devant la fonction d'approximation R donnée dans les équations (8) et (9) ci-dessus. Cela permet notamment d'utiliser la même circuiterie dans une implantation matérielle correspondant à la fois aux transformations en ondelettes directe (en anglais "*forward*") et inverse.

15 Pour un couple de filtres en ondelettes (H_0, H_1) donné, le problème consiste à trouver une séquence d'étapes de lifting qui vont réaliser la transformation en ondelettes. C'est le problème de la factorisation lifting.

 On connaît deux familles de filtres en ondelettes ayant de bonnes propriétés de décorrélation de signaux : la famille WSS/WSS, en abrégé WSS, et la famille HSS/HSA, la notation A/B signifiant que le filtre passe-bas H_0 présente une symétrie A et le filtre passe-haut H_1 présente une symétrie B .

20 Le problème consistant à réaliser des filtres en ondelettes WSS en utilisant des étapes de lifting HSS a été résolu et est décrit dans l'article de Ingrid DAUBECHIES et Wim SWELDENS cité plus haut.

25 Le problème consistant à réaliser des filtres en ondelettes HSS/HSA a été en partie résolu, en utilisant des étapes de lifting WSA.

 Cependant, cette solution n'est que partielle puisque cette réalisation de l'art antérieur ne s'applique qu'à un ensemble limité de filtres en ondelettes HSS/HSA et non à l'ensemble de ces filtres.

30 D'autre part, la publication de E. MAJANI intitulée "*Low-complexity wavelet filter design for image compression*", TDA Progress Report 42-119, NASA Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, 15 novembre 1994, indique

qu'on peut utiliser des étapes de lifting WSA pour transformer par augmentation (en anglais "*lift*") un couple de filtres (H_0, H_1) , où les deux filtres ont le même support, en un couple de filtres de support plus grand (H'_0, H'_1) . Cependant, on n'y trouve aucune indication sur la façon de réaliser, par des étapes de lifting, des couples de filtres (H_0, H_1) où les deux filtres ont même support et où ce support est supérieur à deux.

La présente invention a pour but de remédier à cet inconvénient.

Elle propose une réalisation par lifting de tous les filtres en ondelettes HSS/HSA qui ne peuvent pas être réalisés en utilisant uniquement des étapes de lifting WSA.

Elle apporte donc une solution au problème de la réalisation par lifting de couples de filtres (H_0, H_1) où les deux filtres ont le même support et où ce support est supérieur à 2.

Dans ce but, la présente invention propose un procédé de filtrage adapté à transformer un signal numérique d'entrée en un ou plusieurs signaux numériques de sortie comportant des échantillons de rang pair et des échantillons de rang impair, ce procédé comportant au moins une itération qui contient

- une opération de modification d'échantillons de rang pair par une fonction d'échantillons de rang impair pondérés,
- une opération de modification d'échantillons de rang impair par une fonction d'échantillons de rang pair pondérés,

les échantillons pondérés étant obtenus par au moins une opération de pondération,

ce procédé étant remarquable en ce qu'au moins une des opérations de pondération est appliquée à la différence entre deux échantillons de rang pair consécutifs.

Ainsi, la présente invention permet notamment la réalisation par lifting de tout couple de filtres en ondelettes HSS/HSA, ainsi que la réalisation par lifting de tout couple de filtres orthogonaux et la réalisation par lifting de tout couple de filtres en ondelettes quelconques de support égal.

L'invention permet également, grâce à la technique du filtrage par lifting, de réduire le nombre d'opérations de filtrage (multiplications et additions) par rapport à un filtrage de convolution classique et garantit également le caractère inversible des transformations en ondelettes, c'est-à-dire une
 5 reconstruction parfaite du signal, dans le cas de signaux dont les valeurs d'échantillons sont entières.

Selon une caractéristique particulière, l'opération de modification d'échantillons de rang impair est effectuée à la suite de l'opération de modification d'échantillons de rang pair.

10 Dans un mode particulier de réalisation, l'itération précitée consiste notamment à :

- pondérer, par un premier coefficient de pondération, au moins un échantillon de rang impair voisin d'un échantillon pair en cours de modification, de façon à obtenir un échantillon de rang impair pondéré,
- 15 - modifier au moins un échantillon de rang pair à partir d'au moins un échantillon de rang impair pondéré,
- pondérer, par un deuxième coefficient de pondération, des échantillons de rang pair voisins d'un échantillon impair en cours de modification, de façon à obtenir des échantillons de rang pair pondérés, et
- 20 - modifier au moins un échantillon de rang impair à partir d'au moins un échantillon de rang pair pondéré.

Par échantillon "voisin", on entend un échantillon dont le rang est consécutif à l'échantillon considéré.

25 Selon une caractéristique particulière, le deuxième coefficient de pondération est fonction du premier coefficient de pondération.

Le deuxième coefficient de pondération peut par exemple dépendre du premier coefficient de pondération comme suit :

$$\beta_{0,j} = m_j / \left(1 - 2 \sum_{i=0}^j \alpha_{0,i} \right)$$

où $\alpha_{0,i}$ désigne le premier coefficient de pondération, $\beta_{0,j}$ désigne le deuxième coefficient de pondération, i et j sont des entiers et m_j est une valeur définie par la récurrence $m_0 = (-1)^{L_0}$ et $m_j = -m_{j-1}$, L_0 étant un entier prédéterminé.

5 Selon une caractéristique particulière, à chaque itération, l'échantillon de rang impair voisin de l'échantillon pair en cours de modification est alternativement l'échantillon de rang immédiatement inférieur ou immédiatement supérieur.

10 Selon une caractéristique particulière, le procédé de filtrage comporte, à l'issue de l'itération précitée, une étape de filtrage supplémentaire incluant une opération de pondération par un troisième coefficient de pondération.

Selon une caractéristique particulière, le troisième coefficient de pondération est fonction du coefficient de pondération utilisé à l'étape précédente, comme suit :

15
$$\gamma = -1/(2\beta_{0,L_0-1})$$

où γ désigne le troisième coefficient de pondération, L_0 est un paramètre prédéterminé et β_{0,L_0-1} désigne le coefficient de pondération utilisé à l'étape précédente.

20 Dans l'application de l'invention au filtrage d'images numériques, le signal numérique d'entrée représente une image.

Selon un deuxième aspect, la présente invention propose aussi un procédé de filtrage adapté à transformer un ou plusieurs signaux numériques d'entrée en un signal numérique de sortie, les signaux d'entrée comportant des échantillons de rang pair et des échantillons de rang impair, le procédé
25 comportant au moins une itération qui contient

- une opération de modification d'échantillons de rang impair par une fonction d'échantillons de rang pair pondérés,

- une opération de modification d'échantillons de rang pair par une fonction d'échantillons de rang impair pondérés,

30 les échantillons pondérés étant obtenus par au moins une opération de pondération,

ce procédé étant remarquable en ce qu'au moins une des opérations de pondération est appliquée à la différence entre deux échantillons de rang pair consécutifs.

- 5 Selon une caractéristique particulière, l'opération de modification d'échantillons de rang pair est effectuée à la suite de l'opération de modification d'échantillons de rang impair.

Dans un mode particulier de réalisation, l'itération précitée consiste notamment à :

- pondérer, par un quatrième coefficient de pondération, des échantillons de rang pair voisins d'un échantillon impair en cours de modification, de façon à obtenir des échantillons de rang pair pondérés,
- modifier au moins un échantillon de rang impair à partir d'au moins un échantillon de rang pair pondéré,
- pondérer, par un cinquième coefficient de pondération, au moins un échantillon de rang impair voisin d'un échantillon pair en cours de modification, de façon à obtenir un échantillon de rang impair pondéré et
- modifier au moins un échantillon de rang pair à partir d'au moins un échantillon de rang impair pondéré.

- 20 Selon une caractéristique particulière, le quatrième coefficient de pondération est fonction du cinquième coefficient de pondération.

Le quatrième coefficient de pondération peut par exemple dépendre du cinquième coefficient de pondération comme suit :

$$\beta_{0,j} = m_j / \left(1 - 2 \sum_{i=0}^j \alpha_{0,i} \right)$$

- 25 où $\alpha_{0,i}$ désigne le cinquième coefficient de pondération, $\beta_{0,j}$ désigne le quatrième coefficient de pondération, i et j sont des entiers et m_j est une valeur définie par la récurrence $m_0 = (-1)^{L_0}$ et $m_j = -m_{j-1}$, L_0 étant un entier prédéterminé.

Suivant le deuxième aspect de l'invention, selon une caractéristique particulière, à chaque itération, l'échantillon de rang impair voisin de

l'échantillon pair en cours de modification est alternativement l'échantillon de rang immédiatement inférieur ou immédiatement supérieur.

Suivant le deuxième aspect de l'invention, selon une caractéristique particulière, le procédé de filtrage comporte, à l'issue de l'itération précitée, une
 5 étape de filtrage supplémentaire incluant une opération de pondération par un sixième coefficient de pondération.

Selon une caractéristique particulière, le sixième coefficient de pondération est fonction du coefficient de pondération utilisé à l'étape précédente, comme suit :

$$10 \quad \gamma = -1/(2\beta_{0,L_0-1})$$

où γ désigne le sixième coefficient de pondération, L_0 est un paramètre prédéterminé et β_{0,L_0-1} désigne le coefficient de pondération utilisé à l'étape précédente.

Dans l'application de l'invention au filtrage d'images numériques, le
 15 signal numérique de sortie représente une image.

Selon une caractéristique particulière des premier et second aspects de l'invention, les opérations de modification consistent à appliquer une fonction d'approximation.

Cette fonction peut être :

- 20 - la fonction identité, ou
- une fonction d'une variable réelle qui fournit l'entier le plus proche de la variable, ou
- une fonction d'une variable réelle qui fournit le premier entier inférieur à la variable, ou
- 25 - une fonction d'une variable réelle qui fournit le premier entier supérieur à la variable, ou encore
- une fonction d'une variable décomposée en sous-variables dont la somme est égale à la variable, qui fournit une somme de valeurs approchées des sous-variables, chacune des valeurs approchées des sous-variables étant,
- 30 soit une fonction d'une variable réelle qui fournit l'entier le plus proche de la variable, soit une fonction d'une variable réelle qui fournit le premier entier

inférieur à la variable, soit une fonction d'une variable réelle qui fournit le premier entier supérieur à la variable.

L'invention vise aussi un dispositif de traitement de signal qui comporte des moyens adaptés à mettre en œuvre un procédé de filtrage tel que

5 ci-dessus.

Dans le même but que celui indiqué plus haut, la présente invention propose également, selon un troisième aspect, un dispositif de filtrage numérique adapté à transformer un signal numérique d'entrée en un ou plusieurs signaux numériques de sortie comportant des échantillons de rang

10 pair et des échantillons de rang impair, ce filtre comportant

- au moins un module de pondération,
 - un module pour modifier des échantillons de rang pair par une fonction d'échantillons de rang impair pondérés,
 - un module pour modifier des échantillons de rang impair par une
- 15 fonction d'échantillons de rang pair pondérés,

ces échantillons pondérés étant fournis par le module de pondération, les modules de modification fonctionnant de façon itérative, de façon à modifier au moins une fois des échantillons de rang pair puis au moins une fois des échantillons de rang impair,

20 ce dispositif de filtrage étant remarquable en ce qu'au moins un des modules de pondération précités reçoit en entrée la différence entre deux échantillons de rang pair consécutifs.

Dans le même but que celui indiqué plus haut, la présente invention propose également, selon un quatrième aspect, un dispositif de filtrage numérique adapté à transformer un ou plusieurs signaux numériques d'entrée

25 en un signal numérique de sortie, les signaux d'entrée comportant des échantillons de rang pair et des échantillons de rang impair, ce dispositif de filtrage comportant

- au moins un module de pondération,
 - un module pour modifier des échantillons de rang impair par une
- 30 fonction d'échantillons de rang pair pondérés,

- un module pour modifier des échantillons de rang pair par une fonction d'échantillons de rang impair pondérés,

les échantillons pondérés étant fournis par le module de pondération, le module de modification fonctionnant de façon itérative, de façon à modifier au moins une fois des échantillons de rang impair puis au moins une fois des échantillons de rang pair,

ce dispositif de filtrage étant remarquable en ce qu'au moins un des modules de pondération précités reçoit en entrée la différence entre deux échantillons de rang pair consécutifs.

10 Les caractéristiques particulières et les avantages du dispositif de filtrage étant similaires à ceux du procédé de filtrage selon l'invention, ils ne sont pas rappelés ici.

Toujours dans le même but, l'invention propose aussi un dispositif de traitement de signal incluant un dispositif de filtrage tel que précédemment défini, ou les moyens de mise en œuvre du procédé correspondant.

L'invention concerne aussi un dispositif de traitement de signal incluant au moins deux dispositifs de filtrage tels que précédemment définis, le signal de sortie de l'un des dispositifs de filtrage étant le signal d'entrée de l'autre dispositif de filtrage.

20 L'invention concerne aussi un appareil numérique incluant le dispositif de traitement de signal.

L'invention concerne aussi un appareil photographique numérique incluant le dispositif de traitement de signal.

Toujours dans le même but, la présente invention propose aussi un procédé de codage comportant des étapes adaptées à mettre en œuvre un procédé de filtrage tel que ci-dessus.

Toujours dans le même but, la présente invention propose aussi un dispositif de codage comportant au moins un dispositif de filtrage tel que ci-dessus, ou les moyens de mise en œuvre du procédé correspondant.

30 Toujours dans le même but, la présente invention propose aussi un procédé de compression de signaux numériques, comportant des étapes adaptées à mettre en œuvre un procédé de filtrage tel que ci-dessus.

Toujours dans le même but, la présente invention propose aussi un dispositif de compression de signaux numériques, comportant au moins un dispositif de filtrage tel que ci-dessus, ou les moyens de mise en œuvre du procédé correspondant.

- 5 Un moyen de stockage d'information, lisible par un ordinateur ou par un microprocesseur, intégré ou non au dispositif, éventuellement amovible, mémorise un programme mettant en œuvre un procédé de filtrage tel que ci-dessus.

- 10 La présente invention vise aussi un produit programme d'ordinateur comportant des séquences d'instructions pour mettre en œuvre un procédé de filtrage tel que ci-dessus.

- 15 Les caractéristiques particulières et les avantages des dispositifs de traitement de signal, de l'appareil numérique, de l'appareil photographique numérique, des procédés et dispositifs de codage et de compression, du moyen de stockage et du produit programme d'ordinateur étant similaires à ceux du procédé de filtrage selon l'invention, ils ne sont pas rappelés ici.

- 20 D'autres aspects et avantages de l'invention apparaîtront à la lecture de la description détaillée qui suit d'un mode particulier de réalisation, donné à titre d'exemple non limitatif. La description se réfère aux dessins qui l'accompagnent, dans lesquels :

- la figure 1 représente de manière schématique un dispositif de traitement de données selon l'invention,
- la figure 2 représente de manière schématique un autre dispositif de traitement de données selon l'invention,
- 25 - la figure 3 représente un mode de réalisation du dispositif de traitement de données selon l'invention,
- la figure 4 représente un mode de réalisation de circuit de transformation inclus dans le dispositif de traitement de données de la figure 1,
- la figure 5 est un organigramme illustrant les principales étapes
- 30 d'un procédé de filtrage conforme à la présente invention, dans un premier mode particulier de réalisation ;

- la figure 6 est un organigramme illustrant les principales étapes d'un procédé de filtrage conforme à la présente invention, dans un deuxième mode particulier de réalisation ;

5 - la figure 7 est un organigramme illustrant un mode de réalisation de la détermination des paramètres de lifting à partir des coefficients des filtres en ondelettes ;

- les figures 8A, 8B et 8C sont des organigrammes illustrant respectivement les procédures de calcul notées UNLIFT_H0, UNLIFT_H1 et UNLIFT_EQ intervenant dans l'organigramme de la figure 7 ;

10 - la figure 9 représente un premier mode de réalisation d'un bloc de transformation élémentaire selon la présente invention ; et

- la figure 10 représente un deuxième mode de réalisation d'un bloc de transformation élémentaire selon la présente invention.

15 Selon un mode de réalisation choisi et représenté à la **figure 1**, un dispositif de traitement de données selon l'invention est un dispositif 2 de codage de données qui comporte une entrée 24 à laquelle est reliée une source 1 de données non codées. Le dispositif de traitement de données peut être intégré à un appareil numérique, tel qu'un ordinateur, un appareil photo numérique, un télécopieur, par exemple.

20 La source 1 comporte par exemple un moyen de mémoire, tel que mémoire vive, disque dur, disquette, disque compact, pour mémoriser des données non codées, ce moyen de mémoire étant associé à un moyen de lecture approprié pour y lire les données. Un moyen pour enregistrer les données dans le moyen de mémoire peut également être prévu. La source 1
25 peut également être intégrée à l'appareil numérique.

On considérera plus particulièrement dans la suite que les données à coder sont une suite d'échantillons numériques représentant une image IM.

30 La source 1 fournit un signal numérique d'image SI à l'entrée du circuit de codage 2. Le signal d'image SI est une suite de mots numériques, par exemple des octets. Chaque valeur d'octet représente un pixel de l'image IM, ici à 256 niveaux de gris, ou image noir et blanc. L'image peut être une image multispectrale, par exemple une image en couleur ayant des composantes dans

trois bandes de fréquence, de type rouge-vert-bleu ou luminance et chrominance. Chaque bande est alors traitée de manière analogue à l'image monospectrale.

Des moyens 3 utilisateurs de données codées sont reliés en sortie
5 25 du dispositif de codage 2.

Les moyens utilisateurs 3 comportent par exemple des moyens de mémorisation de données codées, et/ou des moyens de transmission des données codées.

Le dispositif de codage 2 comporte classiquement, à partir de
10 l'entrée 24, un circuit de transformation 21, plus particulièrement concerné par la présente invention, et dont un exemple de réalisation sera détaillé dans la suite. Les transformations envisagées ici sont des décompositions en sous-bandes de fréquence du signal de données, de manière à effectuer une analyse du signal.

15 Le circuit de transformation 21 est relié à un circuit de quantification 22. Le circuit de quantification met en œuvre une quantification connue en soi, par exemple une quantification scalaire, ou une quantification vectorielle, des coefficients, ou de groupes de coefficients, des sous-bandes de fréquence fournies par le circuit 21.

20 Le circuit 22 est relié à un circuit 23 de codage entropique, qui effectue un codage entropique, par exemple un codage de Huffman, ou un codage arithmétique, des données quantifiées par le circuit 22.

La **figure 2** représente un autre dispositif de traitement de données selon l'invention, sous la forme d'un dispositif 5 de décodage de données
25 codées par le dispositif 2.

Des moyens 4 utilisateurs de données codées sont reliés en entrée
54 du dispositif de décodage 5. Les moyens 4 comportent par exemple des moyens de mémoire de données codées, et/ou des moyens de réception des données codées qui sont adaptés à recevoir les données codées transmises
30 par les moyens de transmission 3.

Des moyens 6 utilisateurs de données décodées sont reliés en sortie
55 du dispositif de décodage 5. Les moyens utilisateurs 6 sont par exemple des

moyens de visualisation d'images, ou des moyens de restitution de sons, en fonction de la nature des données traitées.

Le dispositif de décodage 5 effectue globalement des opérations inverses de celles du dispositif de codage 2. Le dispositif 5 comporte un circuit de décodage entropique 51, qui effectue un décodage entropique correspondant au codage du circuit 23. Le circuit 51 est relié à un circuit de déquantification 52, correspondant au circuit de quantification 22.

Le circuit 52 est relié à un circuit de transformation inverse 53, correspondant au circuit de transformation 21. Le circuit de transformation inverse 53 est plus particulièrement concerné par la présente invention. Un exemple de réalisation sera détaillé dans la suite. Les transformations envisagées ici réalisent une synthèse du signal numérique, à partir de sous-bandes de fréquence.

Le dispositif de codage et le dispositif de décodage peuvent être intégrés dans un même appareil numérique, par exemple une caméra numérique. Dans ce cas, le dispositif de traitement de données réalise le codage et le décodage des données.

En référence à la **figure 3**, est décrit un exemple de dispositif 10 mettant en œuvre l'invention. Ce dispositif est adapté à transformer un signal numérique, et selon les exemples développés dans la suite, à l'analyser, ou à le synthétiser ou encore à l'analyser puis le synthétiser. Ainsi, la figure 3 illustre un dispositif de codage ou de décodage.

Le dispositif 10 est ici un micro-ordinateur comportant un bus de communication 101 auquel sont reliés :

- une unité centrale de traitement 100,
- une mémoire morte 102,
- une mémoire vive 103,
- un écran 104,
- un clavier 114,
- un disque dur 108,
- un lecteur de disquettes 109 adapté à recevoir une disquette 110,

- une interface 112 de communication avec un réseau de communication 113,

- une carte d'entrées/sorties 106 reliée à un microphone 111.

La mémoire vive 103 conserve des données, des variables et des résultats intermédiaires de traitement, dans des registres de mémoire portant, dans la description, les mêmes noms que les données dont ils conservent les valeurs. La mémoire vive 103 comporte notamment :

- un registre " k ", contenant la valeur courante de la variable k définie plus loin,
- 10 - un registre " j ", contenant la valeur courante de la variable j définie plus loin,
- un registre " y_i ", dans lequel sont conservées les valeurs des échantillons y_i de l'image transformée au fur et à mesure de leur calcul,
- un registre " $\beta_{k,j}$ ", dans lequel sont conservées les valeurs des
- 15 coefficients de pondération $\beta_{k,j}$, définis plus loin,
- un registre " m_j ", dans lequel sont conservées les valeurs des paramètres m_j , définis plus loin,
- un registre " γ ", dans lequel sont conservées les valeurs des coefficients γ , définis plus loin.

20 Dans le cas où la figure 3 illustre un dispositif de codage, la mémoire morte 102 est adaptée à conserver notamment :

- le programme de fonctionnement de l'unité centrale de traitement 100, dans un registre "*Program*",
- la valeur maximale k_{max} de la variable k , dans un registre " k_{max} ",
- 25 - la valeur des paramètres L_k , définis plus loin, pour toutes les valeurs de la variable k comprises entre 0 et k_{max} , dans un registre " L_k ",
- les valeurs des coefficients de pondération $\alpha_{k,j}$, dans un registre " $\alpha_{k,j}$ ".

Il est à noter que, dans le cas où la figure 3 illustre un dispositif de

30 décodage, le registre "*Program*" est également en mémoire morte mais les registres " k_{max} ", " L_k " et " $\alpha_{k,j}$ " sont en mémoire vive.

L'unité centrale de traitement 100 est adaptée à mettre en œuvre les organigrammes des figures 5 et 7.

Le disque dur 108 mémorise les programmes mettant en œuvre l'invention, ainsi que les données à coder et les données codées selon l'invention. Ces programmes peuvent aussi être lus sur la disquette 110, ou reçus via le réseau de communication 113, ou encore mémorisés en mémoire morte 102.

De manière plus générale, les programmes selon la présente invention sont mémorisés dans un moyen de stockage. Ce moyen de stockage est lisible par un ordinateur ou par un microprocesseur. Ce moyen de stockage est intégré ou non au dispositif, et peut être amovible. Par exemple, il peut comporter une bande magnétique, une disquette ou un CD-ROM (disque compact à mémoire figée).

Le dispositif 10 peut recevoir des données à coder en provenance d'un dispositif périphérique 107, tel qu'un appareil photographique numérique, ou un scanner, ou tout autre moyen d'acquisition ou de stockage de données.

Le dispositif 10 peut également recevoir des données à coder en provenance d'un dispositif distant, via le réseau de communication 113, et transmettre des données codées vers un dispositif distant, toujours via le réseau de communication 113.

Le dispositif 10 peut aussi recevoir des données à coder en provenance du microphone 111. Ces données sont alors un signal de son.

L'écran 104 permet à un utilisateur notamment de visualiser les données à coder, et sert, avec le clavier 114, d'interface utilisateur.

En référence à la **figure 4**, le circuit de transformation 21, ou circuit d'analyse, est un circuit de décomposition dyadique à deux niveaux. Le circuit 21 est, dans ce mode de réalisation, un ensemble classique de filtres, respectivement associés à des décimateurs par deux, qui filtrent le signal d'image selon deux directions respectivement verticale et horizontale, en signaux de sous-bandes de hautes et basses fréquences spatiales. La relation entre un filtre passe-haut et un filtre passe-bas est déterminée par les conditions de reconstruction parfaite du signal. Différents exemples de filtres

vont être envisagés dans la suite. Il est à noter que les filtres de décomposition verticale et horizontale ne sont pas forcément identiques, bien qu'en pratique ce soit généralement le cas. Le circuit 21 comporte ici deux blocs successifs d'analyse B1 et B2 pour décomposer une image IM en des signaux de sous-

5 bandes selon deux niveaux de résolution.

De manière générale, la résolution d'un signal est le nombre d'échantillons par unité de longueur utilisés pour représenter ce signal. Dans le cas d'un signal d'image, la résolution d'un signal de sous-bande est liée au nombre d'échantillons par unité de longueur utilisés pour représenter ce signal

10 de sous-bande horizontalement et verticalement. La résolution dépend du nombre de décimations effectuées, du facteur de décimation et de la résolution de l'image initiale.

Le premier bloc d'analyse B1 reçoit un signal numérique d'image et l'applique à deux filtres numériques respectivement passe-bas et passe-haut

15 210 et 220 qui filtrent le signal d'image selon une première direction, par exemple horizontale dans le cas d'un signal d'image. Après passage par des décimateurs par deux D210 et D220, les signaux filtrés résultants sont respectivement appliqués à deux filtres passe-bas 230 et 250, et passe-haut 240 et 260, qui les filtrent selon une seconde direction, par exemple verticale

20 dans le cas d'un signal d'image. Chaque signal filtré résultant passe par un décimateur par deux respectif D230, D240, D250 et D260. Le bloc B1 délivre en sortie quatre signaux de sous-bandes LL_1 , LH_1 , HL_1 et HH_1 de résolution RES_1 la plus élevée dans la décomposition.

Le signal de sous-bande LL_1 comporte les composantes, ou

25 coefficients, de basse fréquence, selon les deux directions, du signal d'image. Le signal de sous-bande LH_1 comporte les composantes de basse fréquence selon une première direction et de haute fréquence selon une seconde direction, du signal d'image. Le signal de sous-bande HL_1 comporte les composantes de haute fréquence selon la première direction et les

30 composantes de basse fréquence selon la seconde direction. Enfin, le signal de sous-bande HH_1 comporte les composantes de haute fréquence selon les deux directions.

Chaque signal de sous-bande est un ensemble de coefficients réels construit à partir de l'image d'origine, qui contient de l'information correspondant à une orientation respectivement verticale, horizontale et diagonale des contours de l'image, dans une bande de fréquence donnée. Chaque signal de sous-bande peut être assimilé à une image.

Le signal de sous-bande LL_1 est analysé par le bloc d'analyse B2 analogue au précédent pour fournir quatre signaux de sous-bandes LL_2 , LH_2 , HL_2 et HH_2 de niveau de résolution RES_2 .

Chacun des signaux de sous-bandes de résolution RES_2 correspond également à une orientation dans l'image.

A un circuit d'analyse 21 donné, correspond, de manière classique, un circuit de synthèse dont la structure se déduit de celle du circuit d'analyse.

La **figure 5** montre la succession des étapes de lifting réalisant la transformation en ondelettes directe conformément à la présente invention. La transformation inverse sera décrite ensuite en liaison avec la figure 6.

On considère un signal d'entrée x_n à transformer, ayant des échantillons dont les rangs sont compris entre deux entiers i_0 et i_1 (i_1 non compris), en un signal de sortie y_n ayant des échantillons dont les rangs sont compris entre i_0 et i_1 (i_1 non compris).

Une étape d'initialisation 500 consiste tout d'abord à mettre la valeur des échantillons du signal de sortie y_n à celle des échantillons du signal d'entrée x_n .

Lors de l'étape 500, on initialise également deux compteurs, dont la valeur courante sera notée respectivement k et j , à la valeur 0.

Lors de l'étape 500, on initialise aussi le paramètre m_j , mentionné plus haut en relation avec la figure 3, à une valeur $m_0 = (-1)^{L_0}$, où L_0 est un autre paramètre, défini plus loin.

Si on considère un signal y_n ayant des échantillons dont les rangs sont compris entre i_0 et i_1 (i_1 non compris), le signal y_n doit être étendu au-delà de cette plage, suffisamment pour que tous les échantillons du signal de sortie y_n dont les rangs sont compris entre i_0 et i_1 (i_1 non compris) puissent être calculés. Cela ressortira de la description d'un exemple, donnée plus loin.

Ainsi, une procédure d'extension de signal (non représentée sur la figure 5) consiste à calculer les valeurs du signal de sortie y_i pour des valeurs de i sortant d'un intervalle prédéterminé $i_0 \leq i < i_1$:

$$y_i = YPSE(i, i_0, i_1) \quad (14)$$

$$5 \quad \text{où } PSE(i, i_0, i_1) = i_0 + \min[\text{mod}(i - i_0, 2(i_1 - i_0)), 2(i_1 - i_0) - \text{mod}(i - i_0, 2(i_1 - i_0))] \quad (15)$$

où $\min(a, b)$ désigne la fonction fournissant la plus petite des valeurs a et b et $\text{mod}(a, b)$ désigne l'entier compris entre 0 et $b-1$ ($b-1$ inclus) égal à la valeur de a , à un multiple de b près.

L'exemple, nullement limitatif, de procédure d'extension donné ci-dessus s'applique à des signaux tels que les rangs i_0 et i_1 sont pairs. D'autres procédures d'extension peuvent être utilisées dans le cas où l'un au moins des rangs i_0 et i_1 est impair. Néanmoins, le reste de la description s'applique à tous les cas de parité. Par ailleurs, il existe d'autres procédures d'extension pour d'autres types de filtres, comme par exemple, l'extension dite circulaire, connue de l'homme du métier, pour les filtres orthogonaux.

L'étape suivante 502 du procédé de filtrage est la première étape de lifting. C'est une étape de lifting passe-haut.

Dans un mode de réalisation préféré, cette étape de lifting est du type, soit LSC, soit RSC, en fonction de la valeur du paramètre $m_0 = (-1)^{L_0}$, et est définie par :

$$\forall n, y_{2n+1} = y_{2n+1} - R(y_{2n+1-m_0}) \quad (16)$$

Cette étape de lifting correspond au filtre passe-haut HSA $H_1(z) = z - 1$ ou $1 - z$, en fonction de la valeur de m_0 . Elle correspond à une augmentation d'une unité du support du filtre passe-haut équivalent.

A l'issue de l'étape de lifting 502, on effectue un test 504 pour déterminer si la valeur du compteur j est égale ou non à L_0 .

Tant que le résultat du test 504 est négatif, on itère une étape 506 qui consiste essentiellement en une séquence d'opérations de modification et de pondération des échantillons de rang pair ou impair du signal y_n .

En effet, lors de l'étape 506, on effectue une succession de L_0 couples d'étapes de lifting, correspondant à des valeurs du compteur j

comprises entre 0 et L_0-1 , où la première étape de lifting est une étape de lifting passe-bas à coefficient unique :

$$\forall n, y_{2n} = y_{2n} + R(\alpha_{0,j} \cdot y_{2n+m_j}) \quad (17)$$

et où la seconde étape de lifting est une étape de lifting passe-haut HSA :

$$5 \quad \forall n, y_{2n+1} = y_{2n+1} + R(\beta_{0,j} \cdot (y_{2n} - y_{2n+2})) \quad (18)$$

Le paramètre non nul $\alpha_{0,j}$ utilisé dans l'équation (17) est une fonction des coefficients du couple de filtres en ondelettes (H_0, H_1) et son calcul est détaillé plus loin.

10 Étant donné que la valeur de m_j est soit -1 , soit $+1$ comme on va le voir, le rang de l'échantillon y_{2n+m_j} est soit $2n-1$, soit $2n+1$, c'est-à-dire un entier consécutif au rang de l'échantillon y_{2n} en cours de modification. On dit que l'échantillon de rang impair y_{2n+m_j} est voisin de l'échantillon y_{2n} .

15 L'étape de lifting passe-bas à coefficient unique est du type, soit LSC, soit RSC, en fonction de la valeur du paramètre m_j , qui est défini de façon récursive par : $m_j = -m_{j-1}$.

20 Il y a alternance systématique des étapes suivantes (c'est-à-dire correspondant à des valeurs suivantes de j) de lifting passe-bas à coefficient unique : par exemple, la deuxième est du type LSC si la première est du type RSC ou vice versa. La dernière étape de lifting passe-bas à coefficient unique est toujours du type LSC.

L'étape de lifting passe-bas de l'équation (17) garantit que le support du filtre passe-bas équivalent augmente jusqu'à atteindre la valeur du support du filtre passe-haut équivalent de l'étape de lifting passe-haut précédente, i.e. la valeur paire supérieure la plus proche.

25 Conformément à un mode de réalisation préféré de la présente invention, l'étape de lifting passe-haut de l'équation (18) est du type HSA, contrairement à l'art antérieur, qui utilise exclusivement des étapes de lifting à coefficient unique et des étapes de lifting WSA pour la réalisation par lifting de filtres en ondelettes HSS/HSA.

L'étape de lifting passe-haut de l'équation (18) garantit que le support du filtre passe-haut équivalent augmente d'une valeur de deux (c'est-à-dire jusqu'à atteindre la valeur paire supérieure la plus proche) par rapport au support du filtre passe-haut équivalent de l'étape de lifting passe-haut précédente.

La filtre passe-haut équivalent de l'étape de lifting passe-haut de l'équation (18) est du type HSA si et seulement si le filtre passe-haut équivalent de l'étape de lifting passe-haut précédente est HSA et le paramètre non nul $\beta_{0,j}$ utilisé dans l'équation (18) est une fonction du paramètre m_j et des paramètres $\alpha_{0,i}$ provenant des étapes de lifting passe-bas à coefficient unique précédentes, cette fonction étant par exemple définie comme suit :

$$\beta_{0,j} = m_j / \left(1 - 2 \sum_{i=0}^j \alpha_{0,i} \right) \quad (19)$$

A la différence de l'étape de lifting passe-bas de l'équation (17), qui transforme par augmentation les coefficients passe-bas à partir des coefficients passe-haut alternativement à gauche et à droite, l'étape de lifting passe-haut de l'équation (18) transforme par augmentation les coefficients passe-haut à partir des coefficients passe-bas à la fois à gauche et à droite.

Lorsque le résultat du test 504 est positif, c'est-à-dire que $j = L_0$, l'alternance d'étapes de lifting passe-bas SC et passe-haut HSA prend fin et est suivie d'une étape de lifting passe-bas RSC 508, définie par :

$$\forall n, y_{2n} = y_{2n} + R(\gamma \cdot y_{2n+1}) \quad (20)$$

Dans un mode de réalisation préféré, le coefficient γ est calculé en fonction du coefficient de pondération utilisé à l'étape de lifting passe-haut précédente :

$$\gamma = -1 / (2\beta_{0,L_0-1}) \quad (21)$$

afin de garantir que le filtre passe-bas correspondant soit HSS.

L'étape de lifting passe-bas 508 garantit que le support du filtre passe-bas équivalent augmente jusqu'à atteindre la valeur du support du filtre passe-haut équivalent de l'étape de lifting passe-haut précédente, c'est-à-dire,

dans le mode préféré de réalisation décrit ici, l'entier pair supérieur le plus proche.

Dans ce mode préféré de réalisation, on obtient, à l'issue de l'étape 508, un couple correspondant de filtres passe-bas et passe-haut qui sont de support pair égal et qui sont respectivement HSS et HSA.

On procède ensuite à une itération d'étapes de lifting passe-bas WSA (étape 512) et passe-haut WSA (étape 518), soit $k_{\max} - 1$ étapes de lifting WSA au total, la valeur du compteur k croissant de 1 à $k_{\max} - 1$.

Pour cela, à la suite de l'étape 508, on incrémente d'une unité la valeur d'un compteur k à l'étape 510. On incrémente à nouveau la valeur de k après chaque passage par l'étape 512 (voir étape 514 sur la figure 5) et après chaque passage par l'étape 518 (voir étape 520 sur la figure 5).

On réitère les étapes 512, 514, 518 et 520 jusqu'à ce que la valeur de k soit égale à k_{\max} (voir tests 516 et 522 sur la valeur de k , respectivement effectués après les étapes d'incrémentations 514 et 520).

Les étapes de lifting passe-bas WSA 512 sont définies par :

$$\forall n, y_{2n} = y_{2n} + R \left(\sum_{j=0}^{L_{2k-1}-1} \alpha_{2k-1,j} \cdot (y_{2n+1-2j} - y_{2n+1+2j}) \right) \quad (22)$$

et les étapes de lifting passe-haut WSA 518 sont définies par :

$$\forall n, y_{2n+1} = y_{2n+1} + R \left(\sum_{j=0}^{L_{2k}-1} \alpha_{2k,j} \cdot (y_{2n-2j} - y_{2n+2j}) \right) \quad (23)$$

Ces étapes sont connues en soi. Elles ont pour effet une augmentation de la taille du filtre correspondant (passe-bas pour l'étape 512 et passe-haut pour l'étape 518) d'un multiple de quatre.

Pour réaliser des filtres en ondelettes avec un gain en courant continu ou gain DC (en anglais "*Direct Current*") unité et un gain de Nyquist de 2, c'est-à-dire avec une normalisation dite (1,2), aucune étape spécifique de normalisation du type $y_i = G \cdot y_i$, où G est une valeur réelle, n'est nécessaire. En revanche, si une normalisation différente est requise, telle qu'une normalisation ($G_1, 2G_2$) avec un gain DC de G_1 et un gain de Nyquist de $2G_2$, une étape finale de normalisation est nécessaire : $y_{2n} = G_1 \cdot y_{2n}$ et $y_{2n+1} = G_2 \cdot y_{2n+1}$.

La fonction d'approximation R n'est pas nécessairement la même pour toutes les étapes de lifting dans lesquelles elle est utilisée.

Les paramètres à choisir pour la réalisation lifting des filtres HSS/HSA sont $L_k, \alpha_{k,j}, k_{\max}$ et la fonction R à chaque étape de lifting. On peut
 5 ainsi établir une mise en correspondance (en anglais "*one-to-one mapping*") entre ces paramètres et les coefficients et longueurs de tout couple de filtres en ondelettes HSS/HSA à reconstruction parfaite.

La **figure 6** montre la succession des étapes de lifting réalisant la transformation en ondelettes inverse conformément à la présente invention.

10 On considère un signal d'entrée y_n à transformer, ayant des échantillons dont les rangs sont compris entre deux entiers i_0 et i_1 (i_1 non compris) en un signal de sortie x_n ayant des échantillons dont les rangs sont compris entre i_0 et i_1 (i_1 non compris).

Une étape d'initialisation 600 consiste tout d'abord à mettre la valeur
 15 des échantillons du signal de sortie x_n à celle des échantillons du signal d'entrée y_n .

Toutes les étapes de la réalisation lifting inverse sont les opérations inverses des étapes de lifting effectuées dans la transformation directe. Par ailleurs, les étapes de la réalisation lifting inverse sont effectuées dans l'ordre
 20 contraire des étapes de la réalisation lifting directe.

Pour un traitement d'analyse suivi d'un traitement de synthèse des mêmes signaux, tous les paramètres de la transformation inverse sont identiques à ceux choisis pour la transformation directe.

Comme le montre la figure 6, lors de l'étape d'initialisation 600, on
 25 initialise également un compteur, dont la valeur courante est notée k , à la valeur $k_{\max} - 1$.

Si on considère un signal x_n ayant des échantillons dont les rangs sont compris entre i_0 et i_1 (i_1 non compris), le signal x_n doit être étendu au-delà de cette plage, suffisamment pour que tous les échantillons du signal de sortie
 30 x_n dont les rangs sont compris entre i_0 et i_1 (i_1 non compris) puissent être calculés. Cela ressortira de la description d'un exemple, donnée plus loin.

Ainsi, une procédure d'extension de signal (non représentée sur la figure 6) consiste à calculer les valeurs du signal de sortie x_i pour des valeurs de i sortant d'un intervalle prédéterminé $i_0 \leq i < i_1$,

- comme défini par l'équation (24) ci-dessous pour des valeurs de i telles que $\text{mod}(i-i_0, 2(i_1-i_0)) < i_1-i_0$:

$$x_i = x_{i_0 + \text{mod}(i-i_0, 2(i_1-i_0))} \quad (24)$$

où $\text{mod}(a,b)$ désigne l'entier compris entre 0 et $b-1$ ($b-1$ inclus) égal à la valeur de a , à un multiple de b près,

- comme défini par l'équation (25) ci-dessous pour des valeurs paires de i telles que $\text{mod}(i-i_0, 2(i_1-i_0)) \geq i_1-i_0$:

$$x_i = x_{i_0 + \text{mod}(2(i_1-i_0-1)-(i-i_0), 2(i_1-i_0))} \quad (25)$$

- et comme défini par l'équation (26) ci-dessous pour des valeurs impaires de i telles que $\text{mod}(i-i_0, 2(i_1-i_0)) \geq i_1-i_0$:

$$x_i = x_{i_0 + \text{mod}(2(i_1-i_0)-(i-i_0), 2(i_1-i_0))} \quad (26)$$

- Il existe d'autres procédures d'extension pour d'autres types de filtres, comme par exemple, l'extension dite circulaire, connue de l'homme du métier, pour les filtres orthogonaux.

Pour réaliser des filtres en ondelettes avec un gain DC unité et un gain de Nyquist de 2, c'est-à-dire avec une normalisation dite (1,2), aucune étape spécifique de normalisation du type $x_i = G.x_i$, où G est une valeur réelle, n'est nécessaire. En revanche, si une normalisation différente est requise, telle qu'une normalisation $(G_1, 2G_2)$ avec un gain DC de G_1 et un gain de Nyquist de $2G_2$, une étape de normalisation inverse est nécessaire : $x_{2n} = (1/G_1).x_{2n}$ et $x_{2n+1} = (1/G_2).x_{2n+1}$.

- Comme la montre la figure 6, on procède ensuite à une itération d'étapes de lifting passe-bas WSA (étape 602) et passe-haut WSA (étape 608), soit $k_{\max} - 1$ étapes de lifting WSA au total, la valeur du compteur k décroissant de $k_{\max} - 1$ à 1.

Pour cela, on décrémente d'une unité la valeur du compteur k après chaque passage par l'étape 602 (voir étape 604 sur la figure 6) et après chaque passage par l'étape 608 (voir étape 610 sur la figure 6).

On réitère les étapes 602, 604, 608 et 610 jusqu'à ce que la valeur de k soit égale à 1 (voir tests 606 et 612 sur la valeur de k , respectivement effectués après les étapes de décrémentation 604 et 610).

Les étapes de lifting passe-bas WSA 602 sont définies par :

$$\forall n, x_{2n} = x_{2n} - R \left(\sum_{j=0}^{L_{2k-1}-1} \alpha_{2k-1,j} \cdot (x_{2n+1-2j} - x_{2n+1+2j}) \right) \quad (27)$$

et les étapes de lifting passe-haut WSA 608 sont définies par :

$$10 \quad \forall n, x_{2n+1} = x_{2n+1} - R \left(\sum_{j=0}^{L_{2k}-1} \alpha_{2k,j} \cdot (x_{2n-2j} - x_{2n+2j}) \right) \quad (28)$$

Ces étapes sont connues en soi.

Lorsque le résultat du test 606 ou 612 est positif, c'est-à-dire que $k = 1$, l'alternance d'étapes de lifting passe-bas WSA et passe-haut WSA prend fin et est suivie d'une étape de lifting passe-bas RSC 614, définie par :

$$15 \quad \forall n, x_{2n} = x_{2n} - R(\gamma \cdot x_{2n+1}) \quad (29)$$

Dans un mode de réalisation préféré, le coefficient γ est calculé en fonction du coefficient de pondération utilisé à l'étape de lifting passe-haut suivante :

$$20 \quad \gamma = -1 / (2\beta_{0,L_0-1}) \quad (30)$$

Lors de l'étape 614, on initialise aussi le paramètre m_j à la valeur 1 et un compteur j à la valeur L_0-1 .

A l'issue de l'étape de lifting passe-bas 614, on effectue un test 616 pour déterminer si la valeur du compteur j est égale ou non à 0.

Tant que le résultat du test 616 est négatif, on itère une étape 618 qui consiste essentiellement en une séquence d'opérations de modification et de pondération des échantillons de rang pair ou impair du signal x_n .

En effet, lors de l'étape 618, on effectue une succession de L_0 couples d'étapes de lifting, correspondant à des valeurs du compteur j

comprises entre L_0-1 et 0, où la première étape de lifting est une étape de lifting passe-haut HSA :

$$\forall n, x_{2n+1} = x_{2n+1} - R(\beta_{0,j} \cdot (x_{2n} - x_{2n+2})) \quad (31)$$

et où la seconde étape de lifting est une étape de lifting passe-bas à coefficient unique :

$$\forall n, x_{2n} = x_{2n} - R(\alpha_{0,j} \cdot x_{2n+m_j}) \quad (32)$$

Lorsque le résultat du test 616 est positif, c'est-à-dire que $j = 0$, on effectue la dernière étape de lifting 620, qui est l'inverse de la première étape de lifting passe-haut effectuée dans la transformation directe. Dans un mode préféré de réalisation, cette étape de lifting est du type, soit LSC, soit RSC, en fonction de la valeur du paramètre $m_0 = (-1)^{L_0}$, et est définie par :

$$\forall n, x_{2n+1} = x_{2n+1} + R(x_{2n+1-m_0}) \quad (33)$$

La **figure 7** illustre une procédure permettant de déterminer les paramètres de lifting pour tout couple de filtres en ondelettes HSS/HSA donné, défini par les équations (4), (6) et (7) figurant en introduction. Cette procédure s'applique aussi aux filtres orthogonaux ainsi qu'aux filtres quelconques, sans symétrie particulière, de support égal. Les procédures "UNLIFT" apparaissant ci-dessous sont détaillées plus loin.

Comme le montre la figure 7, une première étape 700 consiste à initialiser une variable entière k à 0 et une variable n_0 à -1 et à mémoriser dans une variable l_i , $i \in \{0,1\}$, la longueur, c'est-à-dire le nombre de coefficients, des filtres passe-bas et passe-haut intermédiaires H_0 et H_1 , respectivement (c'est-à-dire le nombre de coefficient des filtres dits équivalents).

Puis une étape 702 consiste à tester si $l_0 < l_1$.

Si le résultat du test 702 est positif, on effectue une étape 704 de détermination des coefficients de l'étape de lifting passe-haut WSA 518 de la figure 5 en appliquant une procédure UNLIFT_H1 (voir figure 8B), à l'issue de laquelle on obtient le nombre de coefficients de lifting L_k , les L_k coefficients $\alpha_{k,i}$ pour $0 \leq i < L_k$ et le nouveau filtre passe-haut intermédiaire H_1 .

A l'étape 704, on incrémente aussi d'une unité la valeur de k , on met à jour la longueur l_i du filtre intermédiaire et on mémorise la valeur 1 dans la variable n_0 .

Si le résultat du test 702 est négatif, on effectue une étape 706 consistant à tester si $l_0 > l_1$.

Si le résultat du test 706 est positif, on effectue une étape 708 de détermination des coefficients de l'étape de lifting passe-bas WSA 512 de la figure 5 en appliquant une procédure UNLIFT_H0 (voir figure 8A), à l'issue de laquelle on obtient le nombre de coefficients de lifting L_k , les L_k coefficients $\alpha_{k,i}$ pour $0 \leq i < L_k$ et le nouveau filtre passe-bas intermédiaire H_0 .

A l'étape 708, on incrémente aussi d'une unité la valeur de k , on met à jour la longueur l_i du filtre intermédiaire et on mémorise la valeur 0 dans la variable n_0 .

Si le résultat du test 706 est négatif, on effectue une étape 710 consistant à tester si la variable n_0 est nulle.

Si le résultat du test 710 est positif, on effectue une étape 712 consistant à mémoriser la valeur 0 dans la variable L_k et à incrémenter d'une unité la valeur de k .

A l'issue de l'étape 712, ou bien si le résultat du test 710 est négatif, on effectue une étape 714 de détermination des coefficients de l'étape de lifting passe-bas à coefficient unique incluse dans l'étape 506 de la figure 5 en appliquant une procédure UNLIFT_EQ (voir figure 8C), à l'issue de laquelle on obtient le nombre de coefficients de lifting L_0 et les L_0 coefficients $\alpha_{0,i}$ pour $0 \leq i < L_0$.

A l'étape 714, on incrémente aussi d'une unité la valeur de k .

A l'issue de l'étape 714, on effectue une étape 716 de réarrangement, consistant à mettre à jour les coefficients de lifting obtenus en les réordonnant, comme suit :

$$(L_0, L_1, \dots, L_{k-1}) = (L_{k-1}, L_{k-2}, \dots, L_0)$$

$$(\alpha_{0,i}, \alpha_{1,i}, \dots, \alpha_{k-1,i}) = (\alpha_{k-1,i}, \alpha_{k-2,i}, \dots, \alpha_{0,i})$$

Lors de l'étape 716, on mémorise aussi la valeur k_{\max} dans la variable k .

En résumé :

- lorsque $l_0 > l_1$, les coefficients de lifting sont obtenus par la procédure UNLIFT_H0(H_0, H_1),
- lorsque $l_0 < l_1$, les coefficients de lifting sont obtenus par la
- 5 procédure UNLIFT_H1(H_0, H_1) et
- lorsque $l_0 = l_1$, les coefficients de lifting sont obtenus par la procédure UNLIFT_EQ(H_0, H_1).

On décrit maintenant ces trois procédures plus en détail.

Comme le montre la **figure 8A**, qui illustre la procédure UNLIFT_H0, une étape d'initialisation 800A consiste à mémoriser dans la variable l_0 la moitié de la longueur de H_0 et à mémoriser dans la variable l_1 la moitié de la longueur de H_1 . Lors de l'étape 800A, on initialise aussi une variable i et la variable L_k à la valeur 0.

Puis une étape 802A consiste à tester si $l_0 > l_1$.

15 Si le résultat du test 802A est négatif, la procédure UNLIFT_H0 est terminée.

Si le résultat du test 802A est positif, une étape 804A consiste à calculer $\alpha_{k,i}$ et $H_0(z)$, comme suit :

$$\alpha_{k,i} = -H_{0,l_0} / H_{1,l_1}$$

$$H_0(z) = H_0(z) - \alpha_{k,i} \cdot (z^{-l_0+l_1} - z^{l_0-l_1}) \cdot H_1(z)$$

20 En fin d'étape 804A, on décrémente de deux unités la valeur de l_0 et on incrémente d'une unité la valeur de i et la valeur de L_k .

Puis on réitère cette étape 804A tant que $l_0 > l_1$.

Comme le montre la **figure 8B**, qui illustre la procédure UNLIFT_H1, une étape d'initialisation 800B identique à l'étape 800A de la figure 8A est

25 d'abord effectuée.

Puis une étape 802B consiste à tester si $l_1 > l_0$.

Si le résultat du test 802B est négatif, la procédure UNLIFT_H1 est terminée.

Si le résultat du test 802B est positif, une étape 804B consiste à

30 calculer $\alpha_{k,i}$ et $H_1(z)$, comme suit :

$$\alpha_{k,i} = -H_{1,l_1} / H_{0,l_0}$$

$$H_1(z) = H_1(z) - \alpha_{k,i} \cdot (z^{-l_1+l_0} - z^{l_1-l_0}) \cdot H_0(z)$$

En fin d'étape 804B, on décrémente de deux unités la valeur de l_1 et on incrémente d'une unité la valeur de i et la valeur de L_k .

Puis on réitère cette étape 804B tant que $l_1 > l_0$.

5 Comme le montre la **figure 8C**, qui illustre la procédure UNLIFT_EQ, une étape d'initialisation 800C consiste à mémoriser dans la variable l_0 la moitié de la longueur de H_0 , à mémoriser dans la variable l_1 la valeur de l_0 . Lors de l'étape 800C, on initialise aussi la variable L_0 à la valeur l_0-1 et une variable i à la valeur L_0-1 .

10 L'étape suivante 802C consiste à calculer $H_0(z)$ et le paramètre γ , comme suit :

$$\gamma = H_{0,l_0} / H_{1,l_1}$$

$$H_0(z) = z \cdot [H_0(z) - \gamma \cdot H_1(z)]$$

En fin d'étape 802C, on décrémente d'une unité la valeur de l_0 et on initialise une variable q à la valeur 0.

15 Puis une étape 804C consiste à tester si $l_0 > 0$.

Si le résultat du test 804C est négatif, la procédure UNLIFT_EQ est terminée.

Si le résultat du test 804C est positif, une étape 806C consiste à tester si $q > 0$.

20 Si le résultat du test 806C est positif, l'étape suivante 808C consiste à calculer $\beta_{0,i}$, $H_1(z)$, $\alpha_{0,i}$ et $H_0(z)$, comme suit :

$$\beta_{0,i} = H_{1,-l_1+1} / H_{0,-l_0+1}$$

$$H_1(z) = z^{-1} \cdot [H_1(z) - \beta_{0,i} \cdot (z^{-1} - z) \cdot H_0(z)]$$

$$\alpha_{0,i} = -H_{0,-l_0+1} / H_{1,-l_1+1}$$

$$H_0(z) = z^{-1} \cdot [H_0(z) - \alpha_{0,i} \cdot H_1(z)]$$

Au cours de l'étape 808C, après calcul de $H_1(z)$, on décrémente d'une unité la valeur de l_1 et, après calcul de $H_0(z)$, on décrémente d'une unité la valeur de l_0 et la valeur de i et on mémorise la valeur 1 dans la variable q .

Puis on réitère cette étape 808C tant que $l_0 > 0$.

Si le résultat du test 806C est négatif, l'étape suivante 810C consiste à calculer $\beta_{0,i}$, $H_1(z)$, $\alpha_{0,i}$ et $H_0(z)$, comme suit :

$$\beta_{0,i} = -H_{1,l_1} / H_{0,l_0}$$

$$H_1(z) = z.[H_1(z) - \beta_{0,i} \cdot (z^{-1} - z) \cdot H_0(z)]$$

$$\alpha_{0,i} = H_{0,l_0} / H_{1,l_1}$$

$$H_0(z) = z.[H_0(z) - \alpha_{0,i} \cdot H_1(z)]$$

- Au cours de l'étape 810C, après calcul de $H_1(z)$, on décrémente d'une unité la valeur de l_1 et, après calcul de $H_0(z)$, on décrémente d'une unité la valeur de l_0 et la valeur de i et on mémorise la valeur 0 dans la variable q .

Puis on réitère cette étape 810C tant que $l_0 > 0$.

- Les **figures 9 et 10** illustrent sous forme schématique un bloc de transformation élémentaire compris dans un dispositif de filtrage conforme à la présente invention, dans deux modes particuliers de réalisation. La figure 9 illustre plus particulièrement un bloc de transformation par lifting directe et la figure 10 illustre plus particulièrement un bloc de transformation par lifting inverse.

- Le dispositif de filtrage 900 schématisé sur la figure 9 est équivalent à celui du bloc BE illustré sur la figure 4.

Il comporte une entrée E_{20} à laquelle est appliqué le signal à transformer. Le signal à transformer comporte une suite d'échantillons $\{x_i\}$, où i est un indice de rang d'échantillon.

- L'entrée E_{20} est reliée à un premier décimateur par deux D_{20} qui délivre les échantillons $\{x_{2i}\}$ de rang pair.

L'entrée E_{20} est également reliée à une avance AV_{21} suivie d'un second décimateur D_{21} , qui délivre les échantillons $\{x_{2i+1}\}$ de rang impair.

- Le premier décimateur D_{20} est relié à un premier filtre A_0 qui filtre les échantillons de rang pair en leur appliquant un coefficient de pondération $\beta_{0,j}$ et une fonction d'approximation comme décrit dans l'équation (18) et les fournit à un additionneur AD_{20} .

L'ensemble formé par le filtre A_0 et l'additionneur AD_{20} est un module de lifting passe-haut, noté FHP sur le dessin.

La sortie du second décimateur D_{21} est également reliée à l'additionneur AD_{20} .

En conséquence, l'additionneur AD_{20} délivre des échantillons intermédiaires y_{2i+1} calculés selon l'équation (18).

5 La sortie de l'additionneur AD_{20} est également reliée à un second filtre A_1 qui filtre les échantillons de rang impair en leur appliquant un coefficient de pondération $\alpha_{0,j}$ et une fonction d'approximation comme décrit dans l'équation (17) et les fournit à un additionneur AD_{21} .

10 L'ensemble formé par le filtre A_1 et l'additionneur AD_{21} est un module de lifting passe-bas, noté FLP sur le dessin.

La sortie du premier décimateur D_{20} est également reliée à l'additionneur AD_{21} .

15 La sortie de l'additionneur AD_{21} est la première sortie S_{20} du bloc de transformation, qui délivre un signal numérique comportant des échantillons basse fréquence y_{2i} .

L'additionneur AD_{20} est relié à une seconde sortie S_{21} du bloc élémentaire, qui délivre un signal numérique comportant des échantillons haute fréquence y_{2i+1} .

20 Le dispositif de filtrage 1000 schématisé sur la figure 10 effectue la transformation inverse de celle effectuée par le dispositif de filtrage 900 schématisé sur la figure 9.

Ce bloc de transformation comporte une première entrée E_{30} à laquelle est appliqué un premier signal à transformer et une seconde entrée E_{31} à laquelle est appliqué un second signal à transformer.

25 Les signaux à transformer comportent ici les échantillons obtenus après filtrage d'analyse d'un signal numérique par le bloc d'analyse de la figure 9. Ces échantillons ont éventuellement été modifiés par un autre traitement entre l'analyse et la synthèse.

30 Plus précisément, le premier signal à transformer comporte les échantillons basse fréquence $\{y_{2i}\}$ et le second signal à transformer comporte les échantillons haute fréquence $\{y_{2i+1}\}$.

Le bloc de synthèse a une structure analogue à celle du bloc d'analyse, et peut en être déduit simplement. En particulier, le bloc de synthèse utilise les mêmes filtres A_0 et A_1 que le bloc d'analyse.

L'entrée E_{30} est reliée à un soustracteur SO_{30} .

5 L'entrée E_{31} est reliée au filtre A_1 , lui-même relié au soustracteur SO_{30} .

L'ensemble formé par le filtre A_1 et le soustracteur SO_{30} est un module de lifting passe-bas, noté ILP sur le dessin.

La sortie du soustracteur SO_{30} délivre un signal numérique
10 comportant des échantillons intermédiaires y_{2i} calculés selon l'équation (32).

La sortie du soustracteur SO_{30} est reliée au filtre A_0 , lui-même relié à un soustracteur SO_{31} auquel est également reliée l'entrée E_{31} .

L'ensemble formé par le filtre A_0 et le soustracteur SO_{31} est un module de lifting passe-haut, noté IHP sur le dessin.

15 La sortie du soustracteur SO_{31} délivre un signal numérique comportant des échantillons reconstruits de rang impair x_{2i+1} .

La sortie du soustracteur SO_{30} délivre un signal numérique comportant des échantillons reconstruits de rang pair x_{2i} .

La sortie du soustracteur SO_{30} est reliée à un interpolateur par deux
20 IN_{30} et la sortie du soustracteur SO_{31} est reliée à un interpolateur par deux IN_{31} lui-même relié à un retard R_{31} . L'interpolateur IN_{30} et le retard R_{31} sont reliés à un additionneur AD_{32} qui délivre en sortie S_{30} le signal comportant les échantillons x_i reconstruits.

On donne maintenant un exemple, nullement limitatif, de
25 transformation directe (en anglais "*forward*") et inverse par lifting pour la réalisation de filtres en ondelettes conformément à l'invention.

La paire de filtres utilisée dans cet exemple est la suivante :

$$H_0(z) = \frac{\alpha.z^{-1} + 1 + z + \alpha.z^2}{2.(\alpha + 1)} \quad (35)$$

$$H_1(z) = \frac{\alpha.z^{-1} + 1 - z + \alpha.z^2}{2.(\alpha - 1)} \quad (36)$$

30 Les paramètres de lifting correspondant à cette paire de filtres sont :

$$k = 1, L_0 = 1 \text{ et } \alpha_{0,0} = \alpha. \quad (37)$$

On choisit également une fonction d'approximation R identique pour toutes les étapes de lifting et définie par $R(x) = E(x+1/2)$ où E désigne la partie entière.

5 La longueur du signal est choisie égale à 6 : $i_0 = 0$ et $i_1 = 6$.

Pour ce qui concerne les équations de lifting directes, toutes les valeurs du signal de sortie Y sont initialisées aux valeurs du signal d'entrée X . Le signal Y est ensuite étendu d'un échantillon à chaque limite : $y_{-1} = y_0$ et $y_6 = y_5$.

10 Les quatre opérations de lifting suivantes sont effectuées. Tout d'abord, les valeurs des échantillons (y_{-1}, y_1, y_3, y_5) sont calculées à partir de :

$$y_{2n+1} = y_{2n+1} - E(y_{2n+2} + 1/2) \text{ pour } n = -1, 0, 1, 2 \quad (38)$$

Ensuite, les valeurs des échantillons (y_0, y_2, y_4, y_6) sont calculées à partir de :

$$15 \quad y_{2n} = y_{2n} + E(\alpha_{0,0} \cdot y_{2n-1} + 1/2) \text{ pour } n = 0, 1, 2, 3 \quad (39)$$

où

$$\alpha_{0,0} = \alpha \quad (40)$$

Puis les valeurs des échantillons (y_1, y_3, y_5) sont calculées à partir de :

$$20 \quad y_{2n+1} = y_{2n+1} + E[\beta_{0,0} \cdot (y_{2n} - y_{2n+2}) + 1/2] \text{ pour } n = 0, 1, 2 \quad (41)$$

où

$$\beta_{0,0} = -1/(1-2\alpha) \quad (42)$$

Enfin, les valeurs des échantillons (y_0, y_2, y_4) sont calculées à partir de :

$$25 \quad y_{2n} = y_{2n} + E(\gamma \cdot y_{2n+1} + 1/2) \text{ pour } n = 0, 1, 2 \quad (43)$$

où

$$\gamma = -1/(2\beta_{0,0}) \quad (44)$$

Pour ce qui concerne les équations de lifting inverses, toutes les valeurs du signal de sortie X sont initialisées aux valeurs du signal d'entrée Y .

30 Le signal X est ensuite étendu de deux échantillons à chaque limite : $x_{-2} = x_0, x_{-1} = -x_1$ et $x_6 = x_4$ et $x_7 = -x_5$.

Les quatre opérations de lifting inverse suivantes sont effectuées.
Tout d'abord, les valeurs des échantillons (x_{-2} , x_0 , x_2 , x_4 , x_6) sont calculées à partir de :

$$x_{2n} = x_{2n} - E(\gamma \cdot x_{2n+1} + 1/2) \text{ pour } n = -1, 0, 1, 2, 3 \quad (45)$$

5 Ensuite, les valeurs des échantillons (x_{-1} , x_1 , x_3 , x_5) sont calculées à partir de :

$$x_{2n+1} = x_{2n+1} - E[\beta_{0,0} \cdot (x_{2n} - x_{2n+2}) + 1/2] \text{ pour } n = -1, 0, 1, 2 \quad (46)$$

Puis les valeurs des échantillons (x_0 , x_2 , x_4 , x_6) sont calculées à partir de :

$$10 \quad x_{2n} = x_{2n} - E(\alpha_{0,0} \cdot x_{2n-1} + 1/2) \text{ pour } n = 0, 1, 2, 3 \quad (47)$$

Enfin, les valeurs des échantillons (x_1 , x_3 , x_5) sont calculées à partir de :

$$x_{2n+1} = x_{2n+1} + E(x_{2n+2} + 1/2) \text{ pour } n = 0, 1, 2 \quad (48)$$

15 Le champ d'application de la présente invention ne se limite pas aux filtres en ondelettes HSS/HSA de support égal, mais s'étend beaucoup plus largement, d'une part, aux filtres en ondelettes orthogonaux et, d'autre part, à des filtres en ondelettes quelconques de support égal.

En ce qui concerne l'application de l'invention à la réalisation par lifting de filtres en ondelettes orthogonaux, la seule différence par rapport à ce qui a été décrit précédemment réside dans la valeur des paramètres de lifting $\alpha_{0,i}$, $\beta_{0,i}$, γ et dans les relations entre ces paramètres, afin de garantir qu'ils réalisent indifféremment des filtres HSS/HSA ou des filtres orthogonaux. Il est à noter que la méthode de calcul des paramètres de lifting, décrite plus haut en liaison avec les figures 7 et 8, peut être utilisée pour engendrer tous les paramètres de lifting $\alpha_{0,i}$, $\beta_{0,i}$, γ pour les filtres HSS/HSA aussi bien que pour les filtres orthogonaux.

Tous les filtres orthogonaux sont de support égal et de longueur paire mais ne sont pas symétriques, sauf dans un cas trivial : le filtre de Haar, défini par $H_0(z) = (1+z)/2$ et $H_1(z) = -1+z$.

30 Les filtres orthogonaux de longueur 4 sont caractérisés par un paramètre θ représentant un degré de liberté :

$$H_0(z) = \frac{\cos \theta \cdot (\sin \theta + \cos \theta) \cdot z^{-1} + \sin \theta \cdot (\sin \theta + \cos \theta) + \sin \theta \cdot (\sin \theta - \cos \theta) \cdot z + \cos \theta \cdot (\cos \theta - \sin \theta) \cdot z^2}{2} \quad (49)$$

$$H_1(z) = \cos \theta \cdot (\cos \theta - \sin \theta) \cdot z^{-1} - \sin \theta \cdot (\sin \theta - \cos \theta) + \sin \theta \cdot (\sin \theta + \cos \theta) \cdot z - \cos \theta \cdot (\sin \theta + \cos \theta) \cdot z^2 \quad (50)$$

De façon plus générale, les filtres orthogonaux satisfont la relation :

$$H_1(z) = 2z \cdot H_0(-z^{-1}) \quad (51)$$

- 5 Dans l'exemple non limitatif donné ici, on choisit, de même que précédemment, une fonction d'approximation R identique pour toutes les étapes de lifting et définie par $R(x) = x+1/2$.

La longueur du signal est choisie égale à 6 : $i_0 = 0$ et $i_1 = 6$.

- 10 La réalisation par lifting d'un tel filtre se fait en utilisant les mêmes étapes que dans l'exemple précédent (excepté pour ce qui concerne la procédure d'extension, décrite plus loin) à ceci près que les paramètres sont ici choisis de la façon suivante :

$$k = 1, L_0 = 1, \alpha_{0,0} = \frac{\cos \theta}{\sin \theta + \cos \theta}, \beta_{0,0} = \cos(2\theta), \gamma = \frac{\sin \theta - \cos \theta}{2(\sin \theta + \cos \theta)} \quad (52)$$

- 15 La procédure de factorisation lifting donnée plus haut est similaire pour les filtres orthogonaux. La seule différence réside dans la relation entre les coefficients $\alpha_{0,i}$, $\beta_{0,i}$, γ .

- Comme on l'a vu pour les filtres HSS/HSA, les paramètres $\alpha_{0,i}$ sont fonction des coefficients des filtres de la transformation en ondelettes à réaliser. Il en est de même pour les filtres orthogonaux. La méthode de calcul des paramètres de lifting décrite plus haut est inchangée.

- 20 Comme on l'a vu pour les filtres HSS/HSA, les paramètres $\beta_{0,i}$ sont fonction des paramètres $\alpha_{0,i}$ et sont tels qu'ils garantissent que le filtre passe-haut $H_1(z)$ équivalent de chaque étape de lifting passe-haut soit HSA. La situation est analogue pour les filtres orthogonaux : les paramètres $\beta_{0,i}$ sont fonction des paramètres $\alpha_{0,i}$ et sont tels qu'ils garantissent que le filtre passe-haut $H_1(z)$ équivalent de chaque étape de lifting passe-haut soit tel que $H_0(z) = -z \cdot H_1(-z^{-1})/2$ et $H_1(z)$ définissent une transformation en ondelettes orthogonale. La méthode de calcul des paramètres de lifting décrite plus haut peut aussi être utilisée pour calculer les paramètres $\beta_{0,i}$.

Enfin, comme on l'a vu pour les filtres HSS/HSA, le paramètre γ est fonction des paramètres β_{0,L_0-1} et est tel qu'il garantisse que le filtre passe-bas $H_0(z)$ équivalent de cette étape de lifting passe-bas soit HSS. La situation est analogue pour les filtres orthogonaux : le paramètre γ est fonction des paramètres $\alpha_{0,i}$ et $\beta_{0,i}$ et est tel qu'il garantisse que le filtre passe-bas $H_0(z)$ équivalent de cette étape de lifting passe-bas soit tel que $H_0(z) = -z.H_1(-z^{-1})/2$. La méthode de calcul des paramètres de lifting décrite plus haut peut aussi être utilisée pour calculer le paramètre γ .

Pour la transformation par lifting directe, toutes les valeurs du signal de sortie Y sont initialisées aux valeurs du signal d'entrée X . Le signal Y est ensuite étendu d'un échantillon à chaque limite : dans l'exemple fourni ici, on utilise une procédure d'extension connue de l'homme du métier sous le nom d'extension circulaire : $y_{-1} = y_5$ et $y_6 = y_0$.

Toutes les étapes ultérieures sont identiques à celles de l'exemple précédent, en utilisant les valeurs données à l'équation (52).

Pour la transformation par lifting inverse, toutes les valeurs du signal de sortie X sont initialisées aux valeurs du signal d'entrée Y . Le signal X est ensuite étendu de deux échantillons à chaque limite : $x_{-2} = x_4$, $x_{-1} = x_5$, $x_6 = x_0$ et $x_7 = x_1$.

Toutes les étapes ultérieures sont identiques à celles de l'exemple précédent, en utilisant les valeurs données à l'équation (52).

En ce qui concerne l'application de l'invention à la réalisation par lifting de filtres en ondelettes quelconques de support égal, les seules différences par rapport à ce qui a été décrit précédemment pour les filtres HSS/HSA et les filtres orthogonaux sont les suivantes :

- il n'y a pas de relation de dépendance entre les paramètres $\alpha_{0,i}$, $\beta_{0,i}$, γ ; il n'est donc pas nécessaire de calculer ces valeurs dans la RAM ;
- la première étape de lifting passe-haut dans la réalisation par lifting directe peut être quelconque, c'est-à-dire :

$$y_{2n+1} = y_{2n+1} - R \left(\sum_i \delta_i \cdot y_{2n+2i} \right) \quad (53)$$

où δ_i est un coefficient de pondération.

Il est à noter que par exemple, si on utilise dans la transformation directe, en lieu et place de l'équation (16), l'équation suivante :

$$y_{2n+1} = y_{2n+1} - R \left(\frac{y_{2n} + y_{2n+2}}{2} \right) \quad (16a)$$

- 5 alors, dans la transformation inverse, la dernière étape de lifting 620 est exactement son inverse, soit, dans le cas ci-dessus :

$$x_{2n+1} = x_{2n+1} + R \left(\frac{x_{2n} + x_{2n+2}}{2} \right) \quad (34)$$

- 10 Tous les coefficients de lifting $\alpha_{0,i}$, $\beta_{0,i}$, γ nécessaires pour la réalisation par lifting d'un couple de filtres en ondelettes quelconques de support égal peuvent être obtenus par l'intermédiaire de la méthode de calcul des paramètres de lifting décrite plus haut en liaison avec les figures 7 et 8. Les coefficients de lifting δ_i sont alors les coefficients d'indice pair du filtre $H_1(z)$ obtenu à partir de la formule $(L_k, \alpha_{k,i}, H_1, H_0) = \text{UNLIFT_EQ}(H_0, H_1)$ de l'étape 714 illustrée sur la figure 7.

REVENDICATIONS

1. Procédé de filtrage adapté à transformer un signal numérique d'entrée (x_n) en un ou plusieurs signaux numériques de sortie (y_n) comportant des échantillons de rang pair (y_{2n}) et des échantillons de rang impair (y_{2n+1}),
 5 ledit procédé comportant au moins une itération (506) qui contient
 - une opération de modification d'échantillons de rang pair (y_{2n}) par une fonction (R) d'échantillons de rang impair pondérés ($\alpha_{0,j} \cdot y_{2n+m_j}$),
 - une opération de modification d'échantillons de rang impair (y_{2n+1})
 10 par une fonction (R) d'échantillons de rang pair pondérés ($\beta_{0,j} \cdot (y_{2n} - y_{2n+2})$),
 lesdits échantillons pondérés étant obtenus par au moins une opération de pondération,
 ledit procédé étant caractérisé en ce qu'au moins une desdites opérations de pondération est appliquée à la différence entre deux échantillons de rang pair
 15 consécutifs.
2. Procédé de filtrage selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite opération de modification d'échantillons de rang impair (y_{2n+1}) est effectuée à la suite de ladite opération de modification d'échantillons de rang pair (y_{2n}).
 20
3. Procédé de filtrage selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que ladite itération (506) consiste notamment à :
 - pondérer, par un premier coefficient de pondération ($\alpha_{0,j}$), au moins un échantillon de rang impair (y_{2n+m_j}) voisin d'un échantillon de rang pair en cours de modification, de façon à obtenir un échantillon de rang impair
 25 pondéré ($\alpha_{0,j} \cdot y_{2n+m_j}$),
 - modifier au moins un échantillon de rang pair (y_{2n}) à partir d'au moins un échantillon de rang impair pondéré ($\alpha_{0,j} \cdot y_{2n+m_j}$),
 - pondérer, par un deuxième coefficient de pondération ($\beta_{0,j}$), des échantillons de rang pair ($y_{2n} - y_{2n+2}$) voisins d'un échantillon de rang impair

en cours de modification, de façon à obtenir des échantillons de rang pair pondérés $(\beta_{0,j} \cdot (y_{2n} - y_{2n+2}))$, et

- modifier au moins un échantillon de rang impair (y_{2n+1}) à partir d'au moins un échantillon de rang pair pondéré $(\beta_{0,j} \cdot (y_{2n} - y_{2n+2}))$.

5 4. Procédé de filtrage selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le deuxième coefficient de pondération $(\beta_{0,j})$ est fonction du premier coefficient de pondération $(\alpha_{0,j})$.

10 5. Procédé de filtrage selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le deuxième coefficient de pondération $(\beta_{0,j})$ dépend du premier coefficient de pondération $(\alpha_{0,j})$ comme suit :

$$\beta_{0,j} = m_j / \left(1 - 2 \sum_{i=0}^j \alpha_{0,i} \right)$$

où $\alpha_{0,i}$ désigne le premier coefficient de pondération, $\beta_{0,j}$ désigne le deuxième coefficient de pondération, i et j sont des entiers et m_j est une valeur définie par la récurrence $m_0 = (-1)^{L_0}$ et $m_j = -m_{j-1}$, L_0 étant un entier prédéterminé.

15 6. Procédé de filtrage selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que, à chaque itération, l'échantillon de rang impair (y_{2n+m_j}) voisin de l'échantillon pair en cours de modification est alternativement l'échantillon de rang immédiatement inférieur (y_{2n-1}) ou immédiatement supérieur (y_{2n+1}) .

20 7. Procédé de filtrage selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comporte, à l'issue de ladite itération (506), une étape de filtrage supplémentaire (508) incluant une opération de pondération par un troisième coefficient de pondération (γ) .

25 8. Procédé de filtrage selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le troisième coefficient de pondération (γ) est fonction du coefficient de pondération utilisé à l'étape précédente, comme suit :

$$\gamma = -1 / (2\beta_{0,L_0} - 1)$$

où γ désigne le troisième coefficient de pondération, L_0 est un paramètre prédéterminé et β_{0,L_0-1} désigne le coefficient de pondération utilisé à l'étape précédente.

5 9. Procédé de filtrage selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le signal numérique d'entrée (x_n) représente une image.

10 10. Procédé de filtrage adapté à transformer un ou plusieurs signaux numériques d'entrée (y_n) en un signal numérique de sortie (x_n), lesdits signaux d'entrée comportant des échantillons de rang pair (y_{2n}) et des échantillons de rang impair (y_{2n+1}), ledit procédé comportant au moins une itération (618) qui contient

- une opération de modification d'échantillons de rang impair (x_{2n+1}) par une fonction (R) d'échantillons de rang pair pondérés ($\beta_{0,j} \cdot (x_{2n} - x_{2n+2})$),
 - une opération de modification d'échantillons de rang pair (x_{2n}) par
- 15 une fonction (R) d'échantillons de rang impair pondérés ($\alpha_{0,j} \cdot (x_{2n+m_j})$),

lesdits échantillons pondérés étant obtenus par au moins une opération de pondération, ledit procédé étant caractérisé en ce qu'au moins une desdites opérations de pondération est appliquée à la différence entre deux échantillons de rang pair consécutifs.

20

11. Procédé de filtrage selon la revendication précédente, caractérisé en ce que ladite opération de modification d'échantillons de rang pair (x_{2n}) est effectuée à la suite de ladite opération de modification d'échantillons de rang impair (x_{2n+1}).

25 12. Procédé de filtrage selon la revendication 10 ou 11, caractérisé en ce que ladite itération (618) consiste notamment à :

- pondérer, par un quatrième coefficient de pondération ($\beta_{0,j}$), des échantillons de rang pair ($x_{2n} - x_{2n+2}$) voisins d'un échantillon impair en cours de modification, de façon à obtenir des échantillons de rang pair pondérés
- 30 ($\beta_{0,j} \cdot (x_{2n} - x_{2n+2})$),

- modifier au moins un échantillon de rang impair (x_{2n+1}) à partir d'au moins un échantillon de rang pair pondéré ($\beta_{0,j} \cdot (x_{2n} - x_{2n+2})$),

- pondérer, par un cinquième coefficient de pondération ($\alpha_{0,j}$), au moins un échantillon de rang impair (x_{2n+m_j}) voisin d'un échantillon pair en cours de modification, de façon à obtenir un échantillon de rang impair pondéré ($\alpha_{0,j} \cdot x_{2n+m_j}$) et

- modifier au moins un échantillon de rang pair (x_{2n}) à partir d'au moins un échantillon de rang impair pondéré ($\alpha_{0,j} \cdot x_{2n+m_j}$).

13. Procédé de filtrage selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le quatrième coefficient de pondération ($\beta_{0,j}$) est fonction du cinquième coefficient de pondération ($\alpha_{0,j}$).

14. Procédé de filtrage selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le quatrième coefficient de pondération ($\beta_{0,j}$) dépend du cinquième coefficient de pondération ($\alpha_{0,j}$) comme suit :

$$\beta_{0,j} = m_j / \left(1 - 2 \sum_{i=0}^j \alpha_{0,i} \right)$$

où $\alpha_{0,i}$ désigne le cinquième coefficient de pondération, $\beta_{0,j}$ désigne le quatrième coefficient de pondération, i et j sont des entiers et m_j est une valeur définie par la récurrence $m_0 = (-1)^{L_0}$ et $m_j = -m_{j-1}$, L_0 étant un entier prédéterminé.

15. Procédé de filtrage selon l'une quelconque des revendications 10 à 14, caractérisé en ce que, à chaque itération, l'échantillon de rang impair (x_{2n+m_j}) voisin de l'échantillon pair en cours de modification est alternativement l'échantillon de rang immédiatement inférieur (x_{2n-1}) ou immédiatement supérieur (x_{2n+1}).

16. Procédé de filtrage selon l'une quelconque des revendications 10 à 15, caractérisé en ce qu'il comporte, préalablement à ladite itération (618),

une étape de filtrage supplémentaire (614) incluant une opération de pondération par un sixième coefficient de pondération (γ).

17. Procédé de filtrage selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le sixième coefficient de pondération (γ) est fonction du coefficient de pondération utilisé à l'étape suivante, comme suit :

$$\gamma = -1/(2\beta_{0,L_0-1})$$

où γ désigne le sixième coefficient de pondération, L_0 est un paramètre prédéterminé et β_{0,L_0-1} désigne le coefficient de pondération utilisé à l'étape suivante.

18. Procédé de filtrage selon l'une quelconque des revendications 10 à 17, caractérisé en ce que le signal numérique de sortie (x_n) représente une image.

19. Procédé de filtrage selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que lesdites opérations de modification consistent à appliquer une fonction d'approximation (R).

20. Procédé de filtrage selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la fonction d'approximation (R) est la fonction identité.

21. Procédé de filtrage selon la revendication 19, caractérisé en ce que la fonction d'approximation (R) est une fonction d'une variable réelle qui fournit l'entier le plus proche de la variable.

22. Procédé de filtrage selon la revendication 19, caractérisé en ce que la fonction d'approximation (R) est une fonction d'une variable réelle qui fournit le premier entier inférieur à la variable.

23. Procédé de filtrage selon la revendication 19, caractérisé en ce que la fonction d'approximation (R) est une fonction d'une variable réelle qui fournit le premier entier supérieur à la variable.

24. Procédé de filtrage selon la revendication 19, caractérisé en ce que la fonction d'approximation (R) est une fonction d'une variable décomposée en sous-variables dont la somme est égale à la variable, qui fournit une somme de valeurs approchées des sous-variables, chacune des valeurs approchées des sous-variables étant, soit une fonction d'une variable réelle qui fournit

l'entier le plus proche de la variable, soit une fonction d'une variable réelle qui fournit le premier entier inférieur à la variable, soit une fonction d'une variable réelle qui fournit le premier entier supérieur à la variable.

25. Dispositif de traitement de signal (10), caractérisé en ce qu'il
5 comporte des moyens adaptés à mettre en œuvre un procédé de filtrage selon l'une quelconque des revendications précédentes.

26. Dispositif de filtrage numérique adapté à transformer un signal
numérique d'entrée (x_n) en un ou plusieurs signaux numériques de sortie (y_n)
comportant des échantillons de rang pair (y_{2n}) et des échantillons de rang
10 impair (y_{2n+1}), ledit dispositif de filtrage comportant

- au moins un moyen de pondération,
- des moyens pour modifier des échantillons de rang pair (y_{2n}) par
une fonction (R) d'échantillons de rang impair pondérés ($\alpha_{0,j} \cdot y_{2n+m_j}$),
- des moyens pour modifier des échantillons de rang impair (y_{2n+1})
15 par une fonction d'échantillons de rang pair pondérés ($\beta_{0,j} \cdot (y_{2n} - y_{2n+2})$),

lesdits échantillons pondérés étant fournis par ledit moyen de
pondération, lesdits moyens de modification fonctionnant de façon itérative, de
façon à modifier au moins une fois des échantillons de rang pair (y_{2n}) puis au
moins une fois des échantillons de rang impair (y_{2n+1}),
20 ledit dispositif de filtrage étant caractérisé en ce qu'au moins un desdits moyens
de pondération reçoit en entrée la différence entre deux échantillons de rang
pair consécutifs.

27. Dispositif de filtrage selon la revendication précédente,
caractérisé en ce que lesdits moyens pour modifier des échantillons de rang
25 impair (y_{2n+1}) sont disposés en aval desdits des moyens pour modifier des
échantillons de rang pair (y_{2n}).

28. Dispositif de filtrage selon la revendication 26 ou 27, caractérisé
en ce qu'il comporte :

- des moyens pour pondérer, par un premier coefficient de
30 pondération ($\alpha_{0,j}$), au moins un échantillon de rang impair (y_{2n+m_j}) voisin

d'un échantillon pair en cours de modification, de façon à obtenir un échantillon de rang impair pondéré $(\alpha_{0,j} \cdot y_{2n+m_j})$,

- des moyens pour modifier au moins un échantillon de rang pair (y_{2n}) à partir d'au moins un échantillon de rang impair pondéré $(\alpha_{0,j} \cdot y_{2n+m_j})$,

- 5 - des moyens pour pondérer, par un deuxième coefficient de pondération $(\beta_{0,j})$, des échantillons de rang pair $(y_{2n} - y_{2n+2})$ voisins d'un échantillon impair en cours de modification, de façon à obtenir des échantillons de rang pair pondérés $(\beta_{0,j} \cdot (y_{2n} - y_{2n+2}))$, et

- 10 - des moyens pour modifier au moins un échantillon de rang impair (y_{2n+1}) à partir d'au moins un échantillon de rang pair pondéré $(\beta_{0,j} \cdot (y_{2n} - y_{2n+2}))$.

29. Dispositif de filtrage selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le deuxième coefficient de pondération $(\beta_{0,j})$ est fonction du premier coefficient de pondération $(\alpha_{0,j})$.

- 15 30. Dispositif de filtrage selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le deuxième coefficient de pondération $(\beta_{0,j})$ dépend du premier coefficient de pondération $(\alpha_{0,j})$ comme suit :

$$\beta_{0,j} = m_j / \left(1 - 2 \sum_{i=0}^j \alpha_{0,i} \right)$$

- 20 où $\alpha_{0,i}$ désigne le premier coefficient de pondération, $\beta_{0,j}$ désigne le deuxième coefficient de pondération, i et j sont des entiers et m_j est une valeur définie par la récurrence $m_0 = (-1)^{L_0}$ et $m_j = -m_{j-1}$, L_0 étant un entier prédéterminé.

- 25 31. Dispositif de filtrage selon l'une quelconque des revendications 26 à 30, caractérisé en ce que, à chaque itération, l'échantillon de rang impair (y_{2n+m_j}) voisin de l'échantillon pair en cours de modification est alternativement l'échantillon de rang immédiatement inférieur (y_{2n-1}) ou immédiatement supérieur (y_{2n+1}) .

32. Dispositif de filtrage selon l'une quelconque des revendications 26 à 31, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens de filtrage supplémentaires incluant des moyens de pondération par un troisième coefficient de pondération (γ).

- 5 33. Dispositif de filtrage selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le troisième coefficient de pondération (γ) est fonction d'un coefficient de pondération utilisé en amont desdits moyens de filtrage supplémentaires, comme suit :

$$\gamma = -1/(2\beta_{0,L_0-1})$$

- 10 où γ désigne le troisième coefficient de pondération, L_0 est un paramètre prédéterminé et β_{0,L_0-1} désigne le coefficient de pondération utilisé en amont desdits moyens de filtrage supplémentaires.

- 15 34. Dispositif de filtrage selon l'une quelconque des revendications 26 à 33, caractérisé en ce que le signal numérique d'entrée (x_n) représente une image.

35. Dispositif de filtrage numérique adapté à transformer un ou plusieurs signaux numériques d'entrée (y_n) en un signal numérique de sortie (x_n), lesdits signaux d'entrée comportant des échantillons de rang pair (x_{2n}) et des échantillons de rang impair (x_{2n+1}), ledit dispositif de filtrage comportant

- 20 - au moins un moyen de pondération,
 - des moyens pour modifier des échantillons de rang impair (x_{2n+1}) par une fonction d'échantillons de rang pair pondérés ($\beta_{0,j} \cdot (x_{2n} - x_{2n+2})$),

 - des moyens pour modifier des échantillons de rang pair (x_{2n}) par une fonction (R) d'échantillons de rang impair pondérés ($\alpha_{0,j} \cdot x_{2n+m_j}$),

- 25 lesdits échantillons pondérés étant fournis par ledit moyen de pondération, lesdits moyens de modification fonctionnant de façon itérative, de façon à modifier au moins une fois des échantillons de rang impair (x_{2n+1}) puis au moins une fois des échantillons de rang pair (x_{2n}),

- 30 ledit dispositif de filtrage étant caractérisé en ce qu'au moins un desdits moyens de pondération reçoit en entrée la différence entre deux échantillons de rang pair consécutifs.

36. Dispositif de filtrage selon la revendication précédente, caractérisé en ce que lesdits moyens pour modifier des échantillons de rang pair (x_{2n}) sont disposés en aval desdits des moyens pour modifier des échantillons de rang impair (x_{2n+1}).

5 37. Dispositif de filtrage selon la revendication 35 ou 36, caractérisé en ce qu'il comporte :

- des moyens pour pondérer, par un quatrième coefficient de pondération ($\beta_{0,j}$), des échantillons de rang pair ($x_{2n} - x_{2n+2}$) voisins d'un échantillon impair en cours de modification, de façon à obtenir des échantillons de rang pair pondérés ($\beta_{0,j} \cdot (x_{2n} - x_{2n+2})$),

10

- des moyens pour modifier au moins un échantillon de rang impair (x_{2n+1}) à partir d'au moins un échantillon de rang pair pondéré ($\beta_{0,j} \cdot (x_{2n} - x_{2n+2})$),

- des moyens pour pondérer, par un cinquième coefficient de pondération ($\alpha_{0,j}$), au moins un échantillon de rang impair (x_{2n+m_j}) voisin d'un échantillon pair en cours de modification, de façon à obtenir un échantillon de rang impair pondéré ($\alpha_{0,j} \cdot y_{2n+m_j}$) et

15

- des moyens pour modifier au moins un échantillon de rang pair (y_{2n}) à partir d'au moins un échantillon de rang impair pondéré ($\alpha_{0,j} \cdot x_{2n+m_j}$).

20 38. Dispositif de filtrage selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le quatrième coefficient de pondération ($\beta_{0,j}$) est fonction du cinquième coefficient de pondération ($\alpha_{0,j}$).

39. Dispositif de filtrage selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le quatrième coefficient de pondération ($\beta_{0,j}$) dépend du

25 cinquième coefficient de pondération ($\alpha_{0,j}$) comme suit :

$$\beta_{0,j} = m_j / \left(1 - 2 \sum_{i=0}^j \alpha_{0,i} \right)$$

où $\alpha_{0,i}$ désigne le cinquième coefficient de pondération, $\beta_{0,j}$ désigne le quatrième coefficient de pondération, i et j sont des entiers et m_j est une valeur définie par la récurrence $m_0 = (-1)^{L_0}$ et $m_j = -m_{j-1}$, L_0 étant un entier prédéterminé.

5 40. Dispositif de filtrage selon l'une quelconque des revendications 35 à 39, caractérisé en ce que, à chaque itération, l'échantillon de rang impair (x_{2n+m_j}) voisin de l'échantillon pair en cours de modification est alternativement l'échantillon de rang immédiatement inférieur (x_{2n-1}) ou immédiatement supérieur (x_{2n+1}) .

10 41. Dispositif de filtrage selon l'une quelconque des revendications 35 à 40, caractérisé en ce qu'il comporte en outre des moyens de filtrage supplémentaires incluant des moyens de pondération par un sixième coefficient de pondération (γ) .

15 42. Dispositif de filtrage selon la revendication précédente, caractérisé en ce que le sixième coefficient de pondération (γ) est fonction du coefficient de pondération utilisé en aval desdits moyens de filtrage supplémentaires, comme suit :

$$\gamma = -1/(2\beta_{0,L_0-1})$$

20 où γ désigne le sixième coefficient de pondération, L_0 est un paramètre prédéterminé et β_{0,L_0-1} désigne le coefficient de pondération utilisé en aval desdits moyens de filtrage supplémentaires.

43. Dispositif de filtrage selon l'une quelconque des revendications 35 à 42, caractérisé en ce que le signal numérique de sortie (x_n) représente une image.

25 44. Dispositif de filtrage selon l'une quelconque des revendications 26 à 43, caractérisé en ce que lesdits moyens de modification comportent des moyens pour appliquer une fonction d'approximation (R) .

45. Dispositif de filtrage selon la revendication précédente, caractérisé en ce que la fonction d'approximation (R) est la fonction identité.

46. Dispositif de filtrage selon la revendication 44, caractérisé en ce que la fonction d'approximation (R) est une fonction d'une variable réelle qui fournit l'entier le plus proche de la variable.

5 47. Dispositif de filtrage selon la revendication 44, caractérisé en ce que la fonction d'approximation (R) est une fonction d'une variable réelle qui fournit le premier entier inférieur à la variable.

48. Dispositif de filtrage selon la revendication 44, caractérisé en ce que la fonction d'approximation (R) est une fonction d'une variable réelle qui fournit le premier entier supérieur à la variable.

10 49. Dispositif de filtrage selon la revendication 44, caractérisé en ce que la fonction d'approximation (R) est une fonction d'une variable décomposée en sous-variables dont la somme est égale à la variable, qui fournit une somme de valeurs approchées des sous-variables, chacune des valeurs approchées des sous-variables étant, soit une fonction d'une variable réelle qui fournit
15 l'entier le plus proche de la variable, soit une fonction d'une variable réelle qui fournit le premier entier inférieur à la variable, soit une fonction d'une variable réelle qui fournit le premier entier supérieur à la variable.

20 50. Dispositif de traitement de signal (2,5), caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif de filtrage selon l'une quelconque des revendications 26 à 49.

51. Dispositif de traitement de signal (2,5) incluant au moins deux dispositifs de filtrage selon l'une quelconque des revendications 26 à 49, le signal de sortie d'un des dispositifs de filtrage étant le signal d'entrée de l'autre dispositif de filtrage.

25 52. Appareil numérique, caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif de traitement de signal selon l'une quelconque des revendications 25, 50 et 51.

53. Appareil photographique numérique, caractérisé en ce qu'il comporte un dispositif de traitement de signal selon l'une quelconque des revendications 25, 50 et 51.

30 54. Procédé de codage, caractérisé en ce qu'il comporte des étapes adaptées à mettre en œuvre un procédé de filtrage selon l'une quelconque des revendications 1 à 24.

55. Dispositif de codage, caractérisé en ce qu'il comporte au moins un dispositif de filtrage selon l'une quelconque des revendications 26 à 49.

56. Procédé de compression de signaux numériques, caractérisé en ce qu'il comporte des étapes adaptées à mettre en œuvre un procédé de
5 filtrage selon l'une quelconque des revendications 1 à 24.

57. Dispositif de compression de signaux numériques, caractérisé en ce qu'il comporte au moins un dispositif de filtrage selon l'une quelconque des revendications 26 à 49.

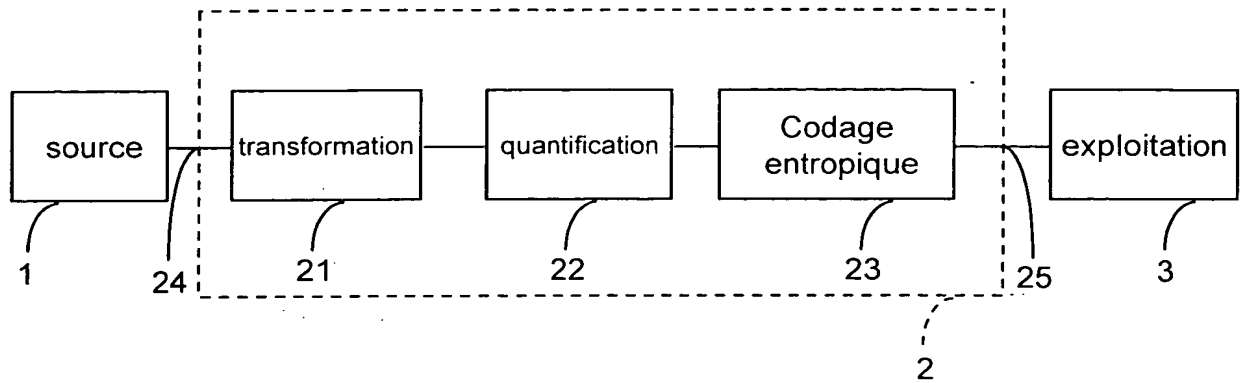


FIG. 1

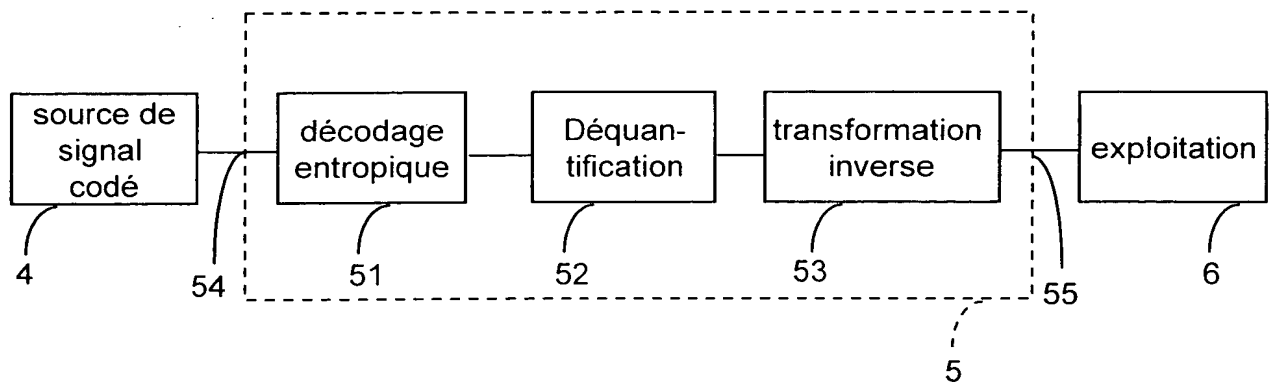


FIG. 2

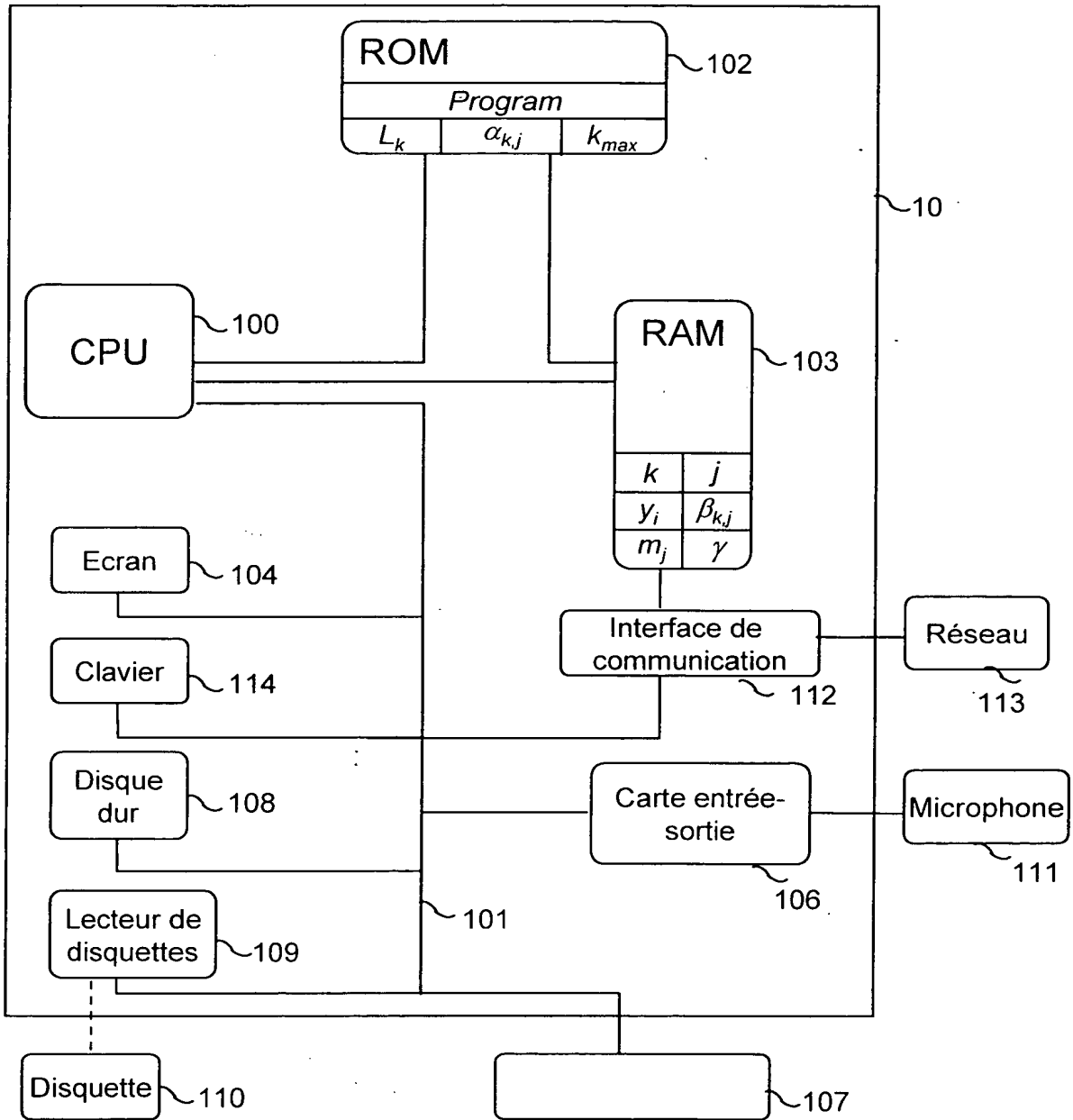


FIG. 3

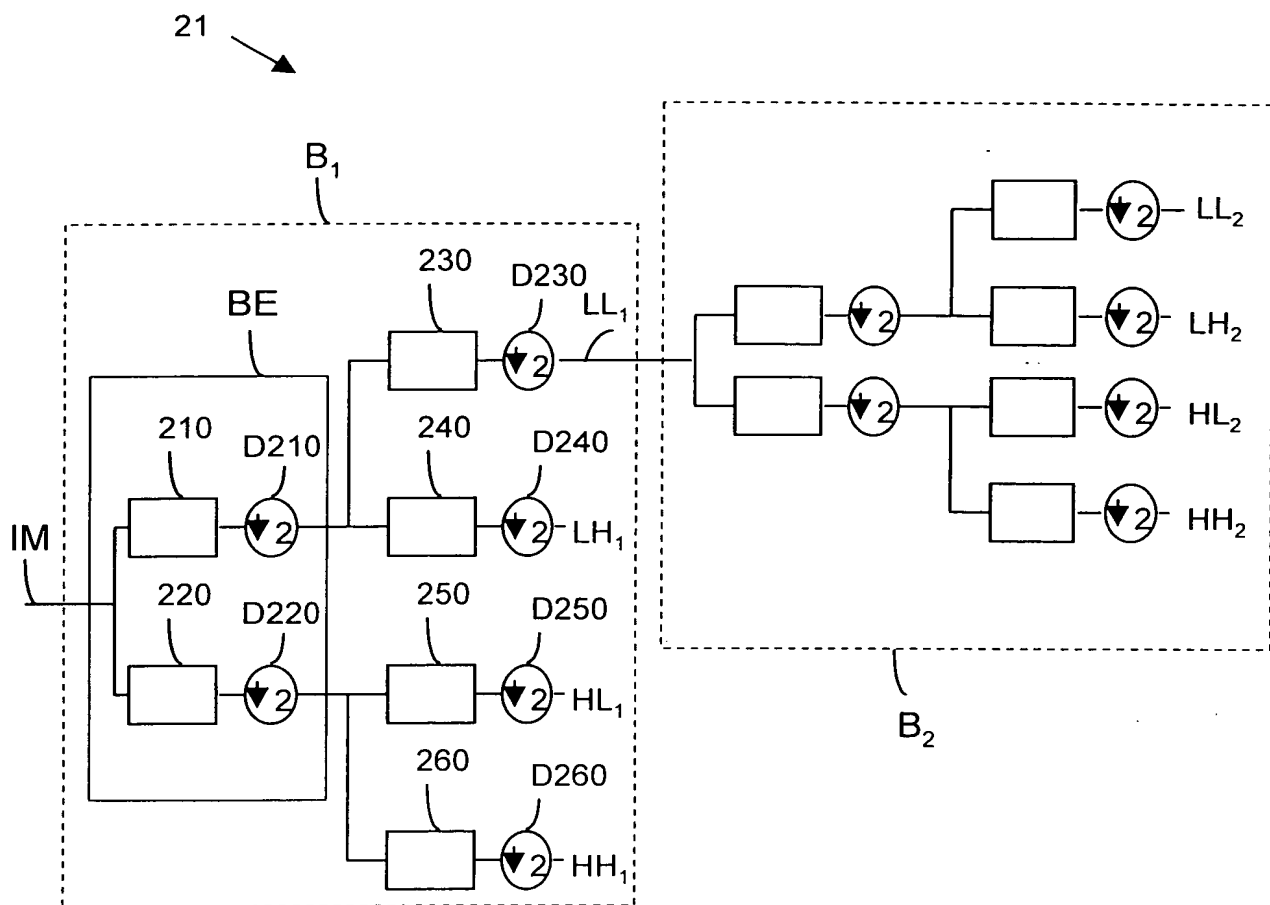


FIG. 4

FIG. 5

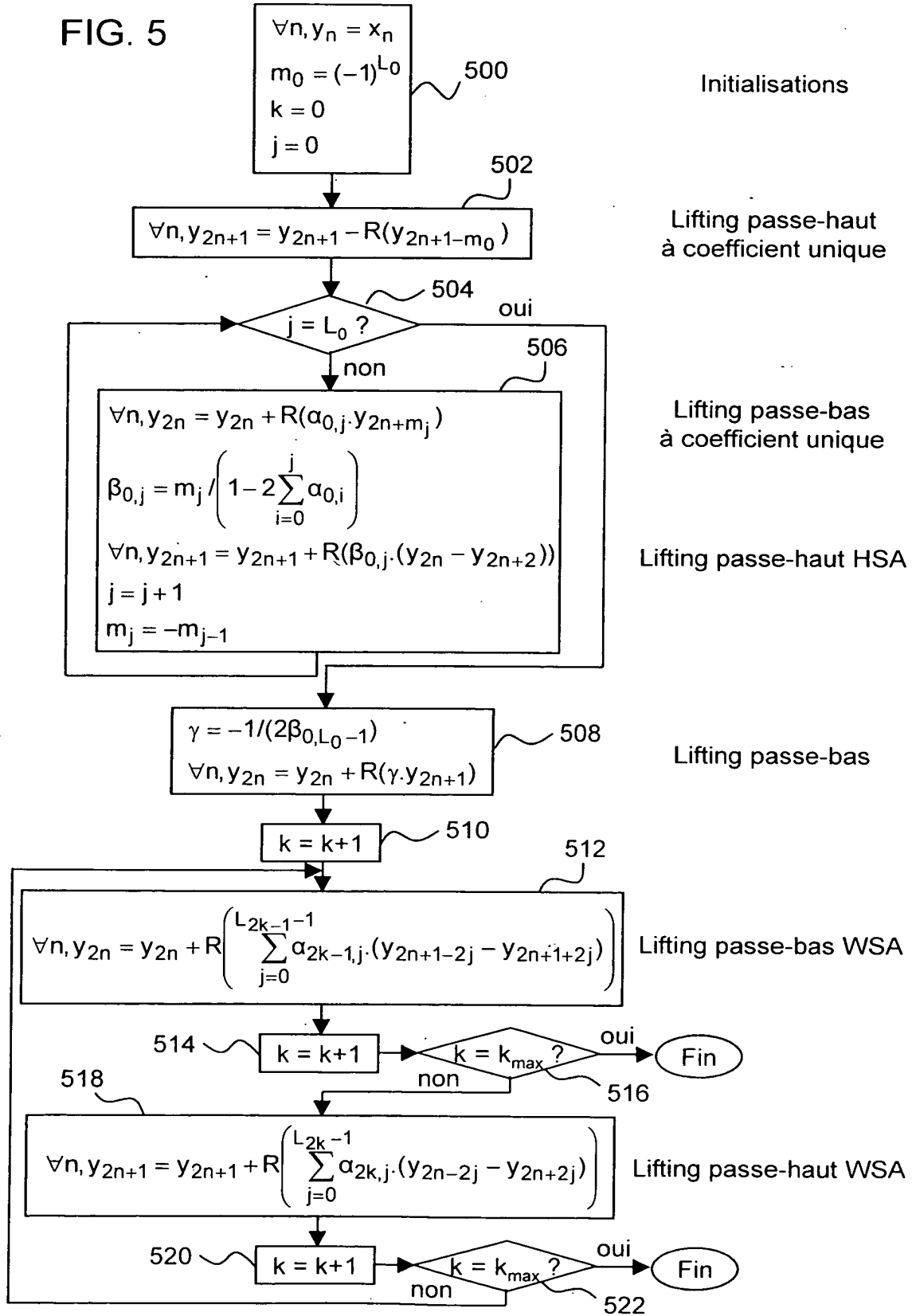
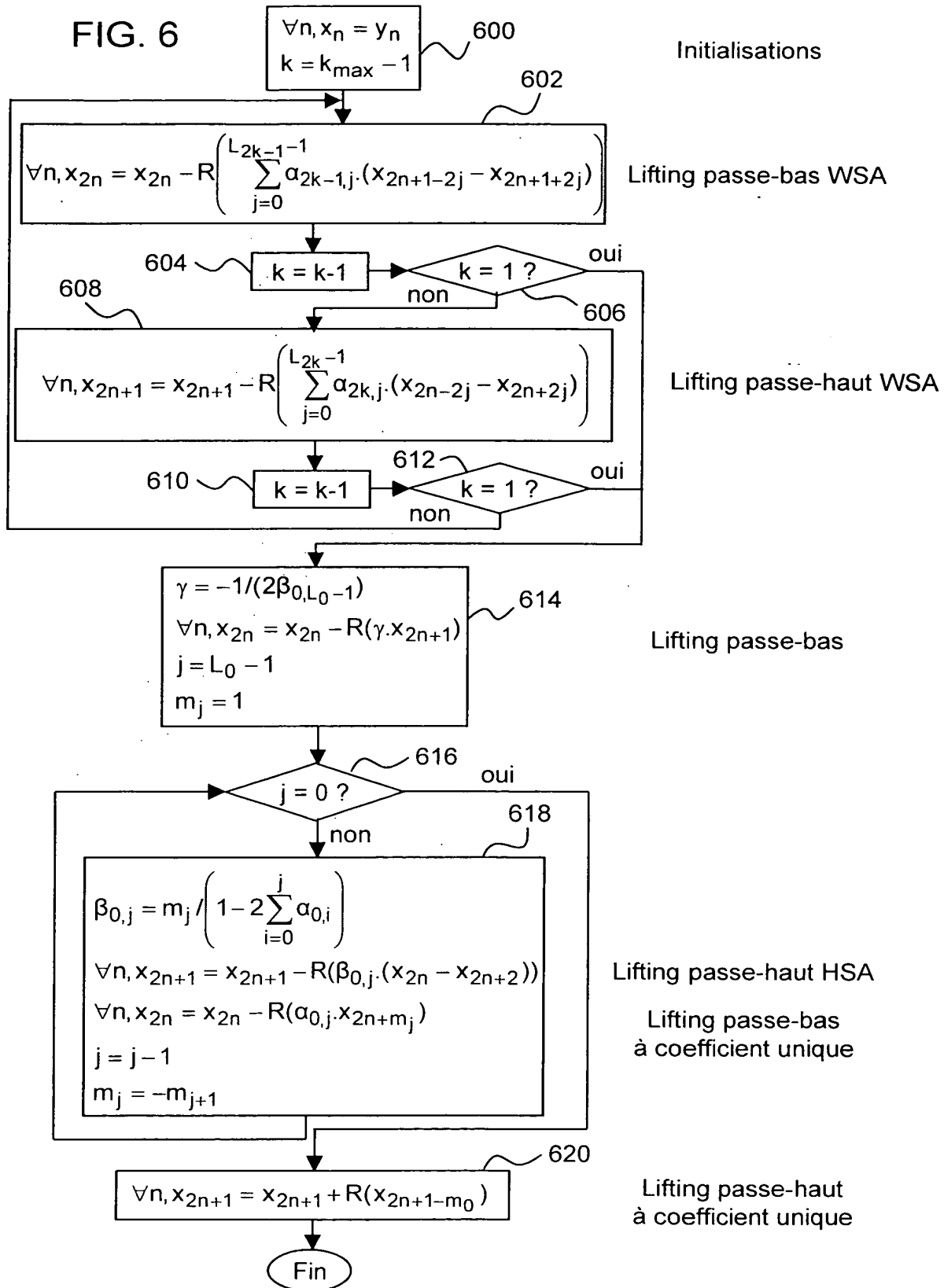


FIG. 6



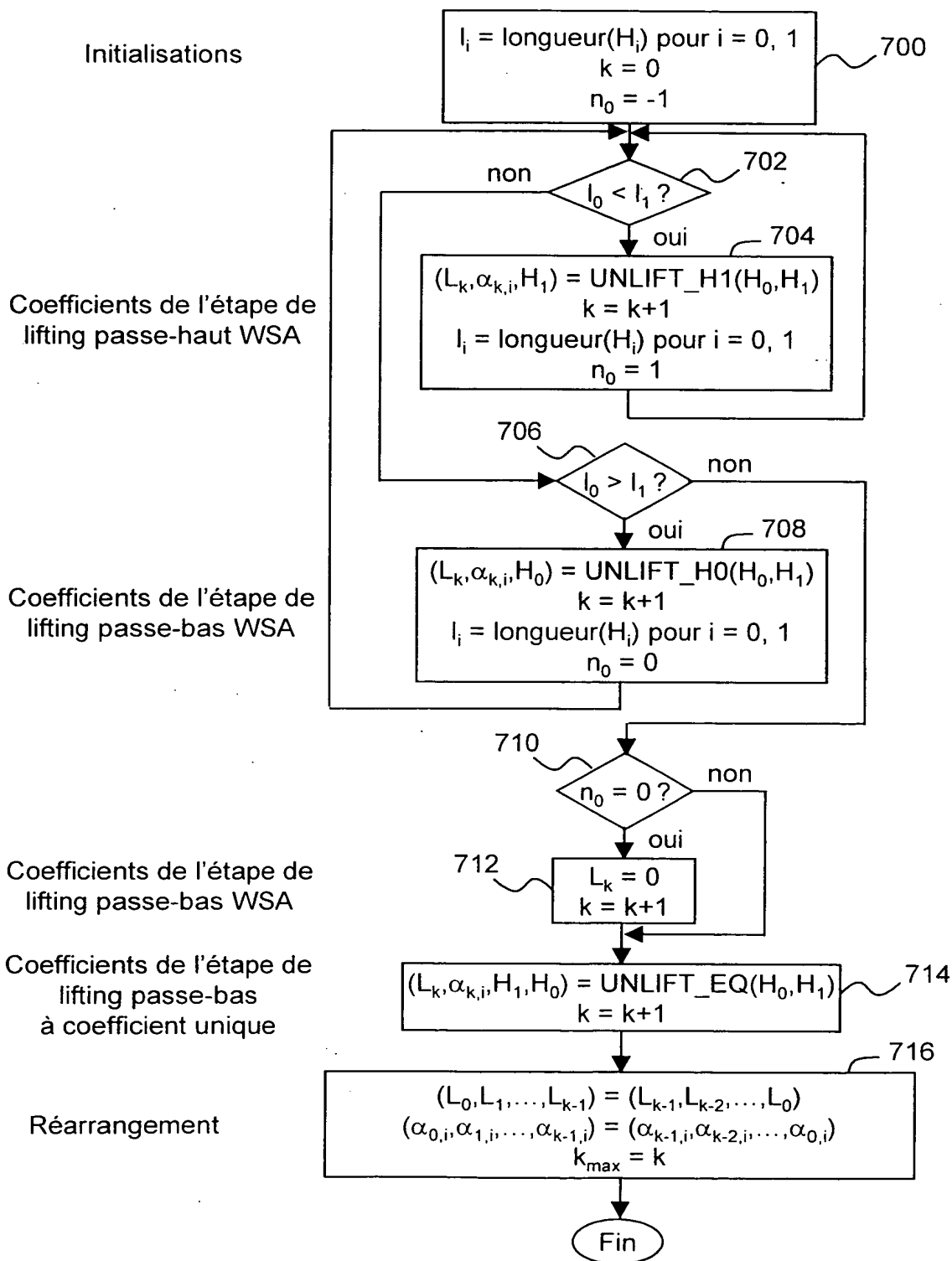


FIG. 7

FIG. 8A

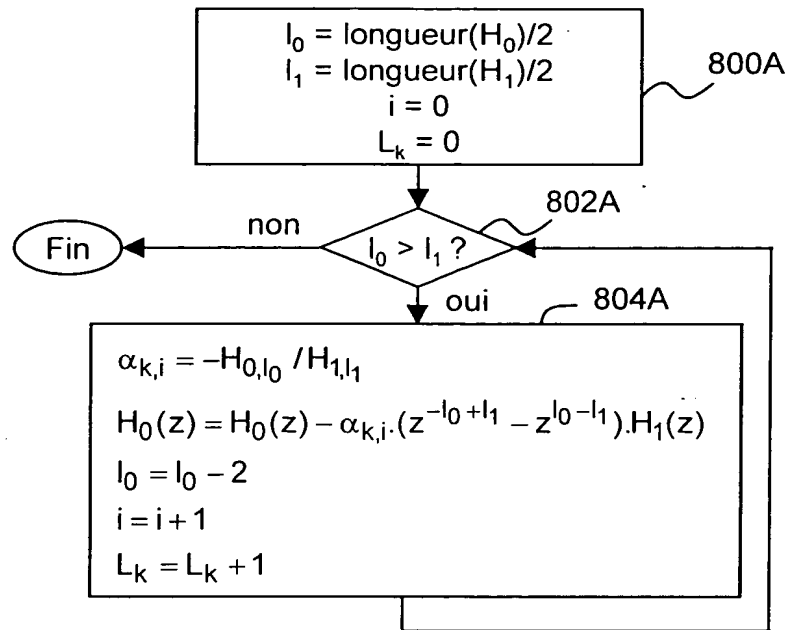
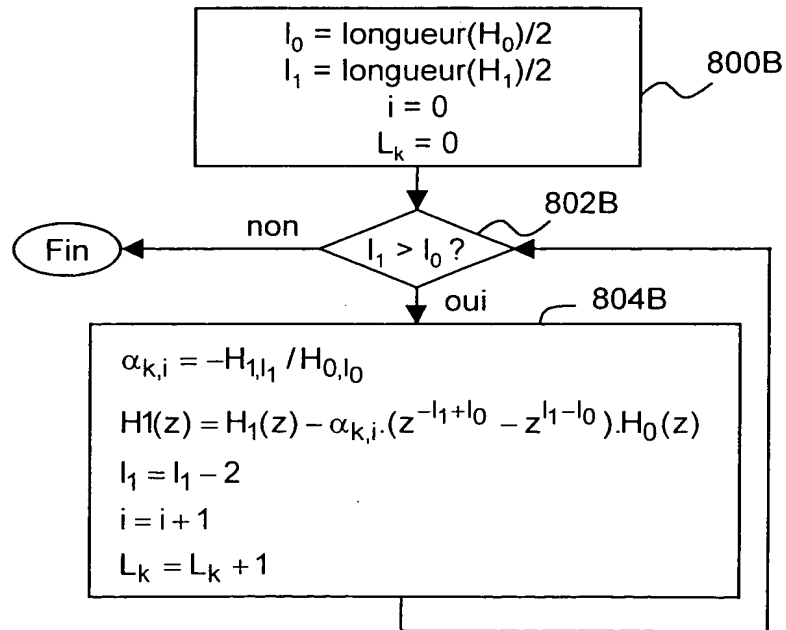


FIG. 8B



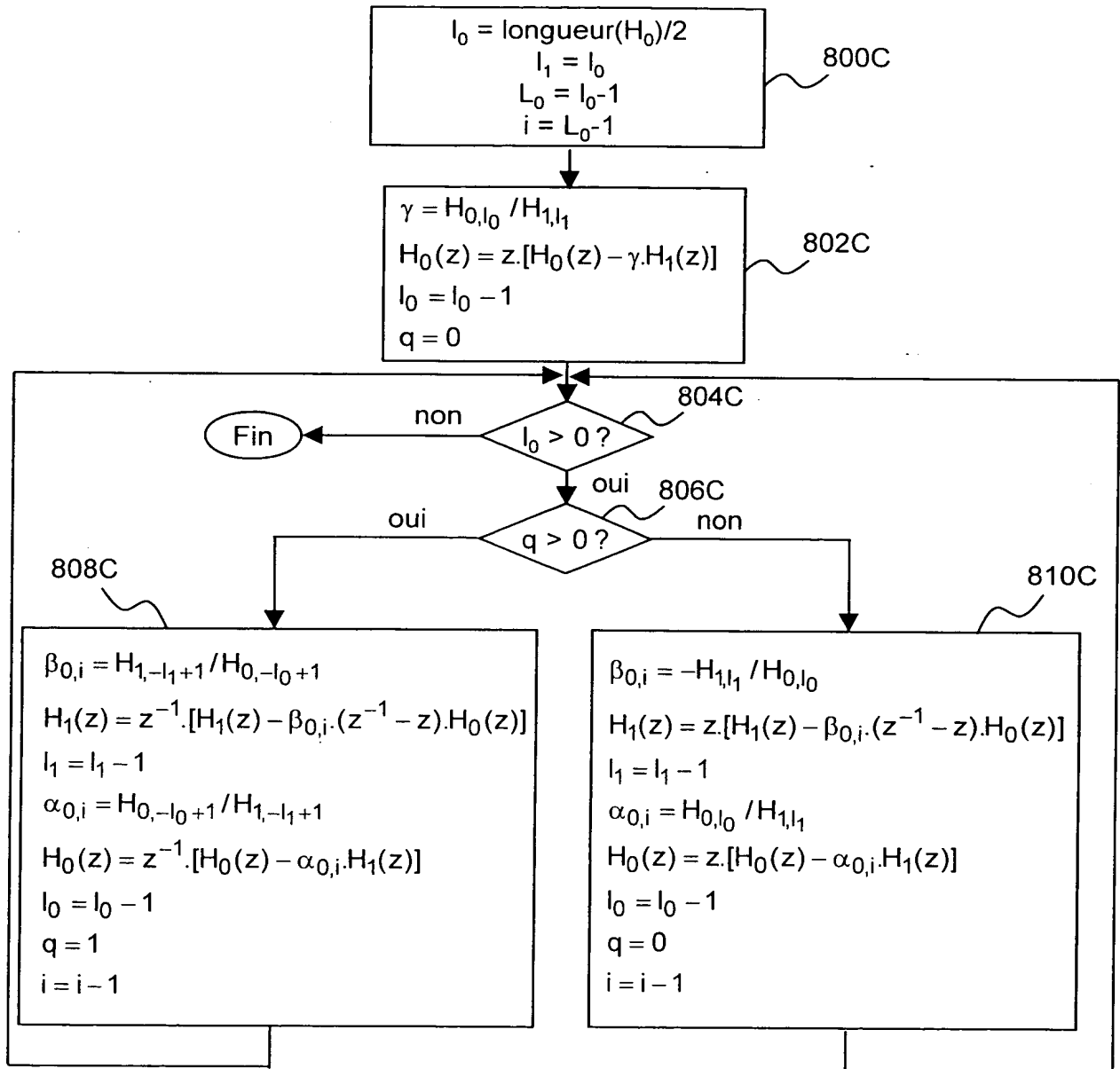


FIG. 8C

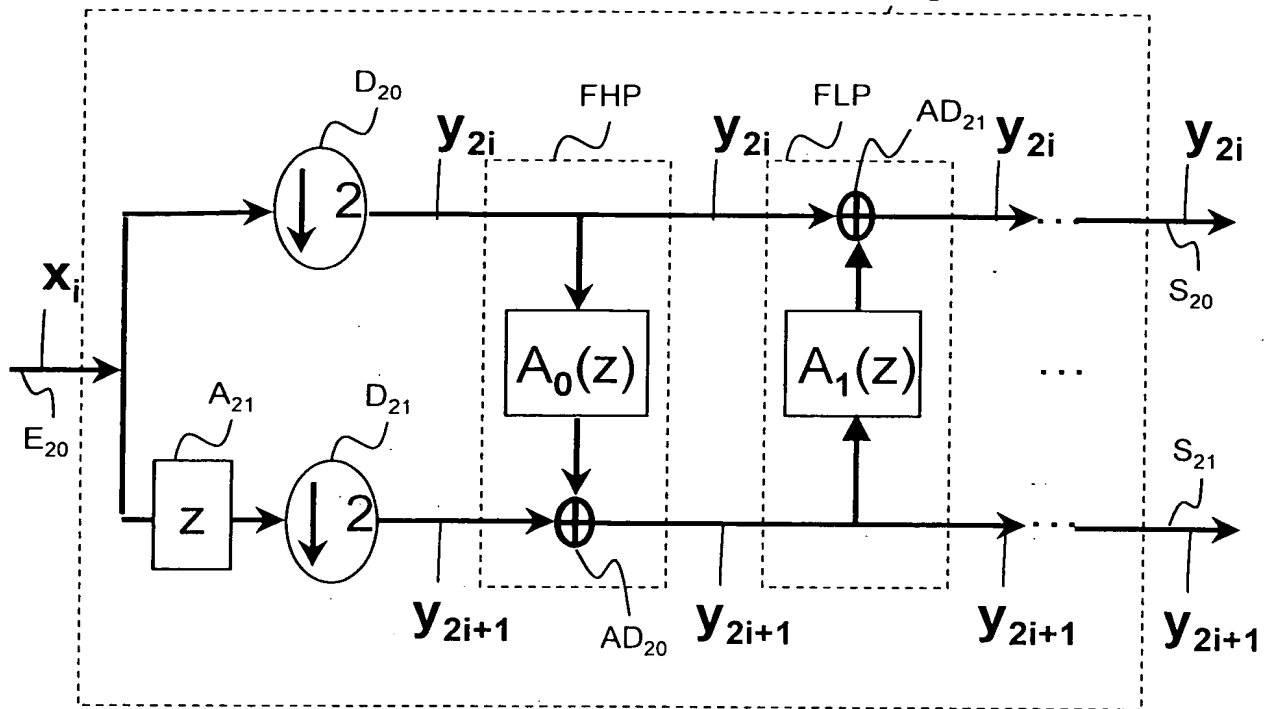


FIG. 9

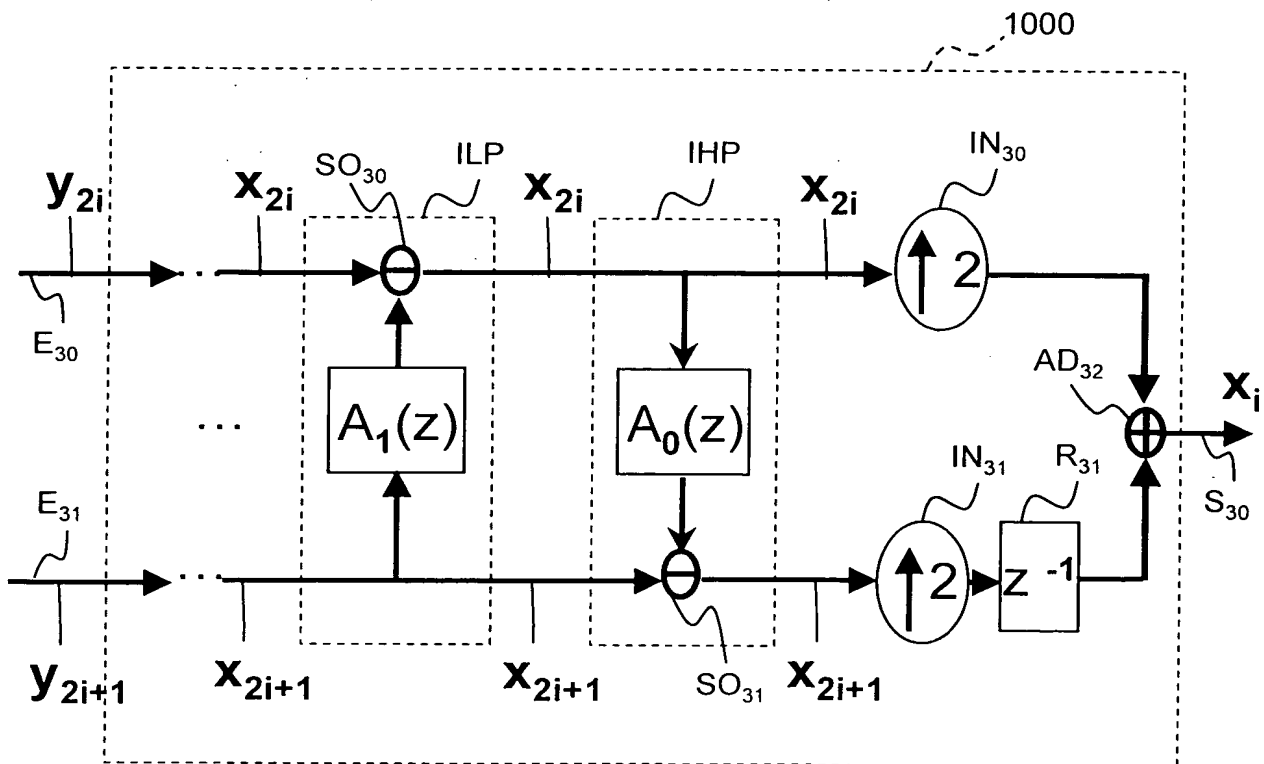


FIG. 10